ISSN 2686-7877 (print)

ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 1 Выпуск 2



**ГИДРОСФЕРА.
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ**

Том 1, Выпуск 2

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

**HYDROSPHERE.
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA
(GIDROSFERA.
OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)**

Volume 1, Issue 2

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Кадацкой Марии Михайловны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77 – 76914** от 11.10.2019

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н.

Для почтовых отправлений: 199155 Санкт-Петербург, а/я 136, Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»

Тел. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru of technical editor **Mariya Kadatskaya**.

Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.
Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77 – 76914** from 11.10.2019

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»

EDITORIAL ADDRESS:

St. Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island, 97 of. 3n.

For mail: 199155 St. Petersburg, PO Box 136 Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»

Tel. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ГИДРОСФЕРЕ ЗЕМЛИ
HAZARDOUS PROCESSES AND PHENOMENA IN THE HYDROSPHERE OF THE EARTH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1
DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.001

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СЕЛЕВОЙ ГЕОСИСТЕМЕ

Н.А. Казаков[1,2]

[1]ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
[2]НИЦ «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск, Россия
cdsmd@yandex.ru

Аннотация. Рассматривая эволюцию селевой геосистемы как непрерывный процесс, включающий в себя последовательность стадий её эволюции (формирование массива рыхлообломочных пород в селевом очаге в результате геологических процессов, трансформация его в потенциальный селевой массив вследствие диагенеза и морфогенеза, возникновение и движение селя, разгрузка крупнообломочного и затем – тонкодисперсного материала и прохождение селевого паводка), можно описать каждую стадию эволюции селевой геосистемы как переход с одного подсистемного уровня на другой, а смену состояний системы, обусловленную физическими процессами, происходящими внутри системы - как фазовые переходы первого рода. Наиболее важен переход из твёрдого

PHASE TRANSITIONS IN THE DEBRIS FLOW GEOSYSTEMS

Nikolay A. Kazakov[1,2]

[1]Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
[2]Research Center «Geodinamics», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
cdsmd@yandex.ru

Abstract. The evolution of a debris-flow geosystem can be described as a continuous process. Stages of geosystems evolution: the formation of a massif of loose rocks in a debris-flow site, its transformation to potential debris-flow massifs due to diagenesis and morphogenesis, the occurrence and movement of a debris flow, unloading of large-block and then – fine-dispersed material and the passage of a debris-flow. Each stage of the debris-flow geosystem evolution can be described as a transition from one subsystem level to another and the change of states of the system – as phase transitions of first kind. Physical processes occurring within the system cause it. The most important

Kazakov N.A. Phase transitions in the debris flow geosystems. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 172-189 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.001

состояния (потенциальный селевой массив как условно однородное твёрдое тело, обладающее внутренней структурой) в селевой поток (квазижидкое состояние). Эволюция потенциального селевого массива и обеспечение его перехода в другое фазовое состояние обусловлена не только внешними факторами (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними: прежде всего, минералогическим составом горных пород потенциального селевого массива (содержанием гидрофильных минералов). С этой точки зрения, важнейшим параметром, обуславливающим как связность грунтов потенциального селевого массива, так и условия его перехода в жидкую фазу, и позволяющим построить физическую модель, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (глинистыми частицами), обеспечивающие энергию связи между ними. Жидкая составляющая селя традиционно описывается как «селевая суспензия», однако с точки зрения физики суспензией связный сель не является, поскольку суспензия – это взвесь, грубодисперсная система, состоящая из твёрдой дисперсной фазы и жидкой дисперсионной среды, в которой твёрдое вещество равномерно распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном состоянии. Такая среда не способна переносить на большие расстояния глыбово-валунный материал, имеющий более высокую плотность, чем суспензия. Но связный сель представляет

transition is from a solid state (potential debris-flows massif-conditionally homogeneous solid having an internal structure) to a debris-flow and mudflow (quasi-liquid state). The transition of a potential debris-flow massif to another phase state is due not only to external factors (the inflow of free water into the debris-flow site), but also internal: the mineralogical composition of rocks of the potential debris-flow massif (the content of hydrophilic minerals). The most important parameter that determines both the connectivity of the soils of the potential debris-flow massif and the conditions of its transition to the liquid phase are the electric forces at the contacts between the elements of the mineral skeleton (soil particles). Electrical forces provide a connection between the ground particles. The liquid component of the mudflow is traditionally described as a "debris-flow suspension", but a coherent debris-flow and mudflow is not a suspension. A suspension is a dispersed system consisting of a solid dispersed phase and a liquid dispersion medium in which the solid is uniformly distributed as minute particles in a liquid substance in suspension. Such a medium is not able to carry over long distances block-boulder material having a higher density than the suspension. Nevertheless, a coherent debris-flow and mudflow is a conditionally single-phase system in

собой условно однофазную систему, в которой вода находится преимущественно в молекулярно связанном состоянии. Наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система, поскольку в связном селе частицы мелкозёма распределены в непрерывной дисперсионной среде и в осадок не выпадают. Это обстоятельство является ключевым при физическом моделировании связных селей.

Ключевые слова: потенциальный селевой массив; связный сель; селевой процесс; селевая геосистема; селевая суспензия; коллоид; фазовый переход.

which water is predominantly in a molecular bound state. The physical analogue of a coherent debris-flow and mudflow is a colloidal system, since in a connected village fine-earth particles are distributed in a continuous dispersion medium and do not precipitate. This circumstance is key in the physical modeling of connected debris-flows and mudflows.

Keywords: coherent Debris-Flow; debris flow; debris flow geosystems; phase transitions; suspension; colloidal system; potential debris-flow massif

Введение

При изучении селевых процессов исследователь сталкивается с рядом феноменов, не получивших достаточно убедительного объяснения в рамках классических представлений, сложившихся в селеведении: например, с феноменом возникновения селевых волн или с закономерностями трансформации массива рыхлообломочных горных пород в сель.

Нет убедительных объяснений феномену переноса на большие расстояния валунно-глыбового материала несвязными селями (*водо-каменными*).

По нашему мнению, одной из проблем является и то, что на сегодняшний день не существует удовлетворительных физических моделей селевого процесса, позволяющих адекватно описать как движущийся сель, так и селевой процесс в целом. Существующие математические модели, как правило, основаны на идеальных математических либо эмпирических представлениях, сильно упрощающих реальную картину селевого процесса, и описывают его лишь с большой степенью приближённости.

При этом единый процесс эволюции селевой геосистемы (формирование и развитие потенциального селевого массива, зарождение и движение селя, формирование селевых отложений) описывается дискретно: как явления слабо связанные (или не связанные) между собой.

Такой подход не позволяет построить единую модель селевого процесса, без чего не возможна разработка методологии прогнозирования селей с определёнными параметрами и создание новых методов противоселевой защиты.

Постановка задачи

Любой сложный физический объект (в том числе природный) или совокупность объектов, между которыми существуют физические связи, можно описать как физическую систему.

Такой подход позволил В.Б. Сочаве создать учение о геосистемах [Сочава, 1978]. В таком случае участок земной поверхности (ландшафт), на котором возникают сели, можно описать как селевую геосистему, в которой селевой бассейн, потенциальный селевой массив, сель, селевые отложения следует рассматривать и описывать как подсистемные уровни в селевой геосистеме.

Эволюция селевой геосистемы в нашем понимании – детерминированный процесс, обусловливающий седиментацию и диагенез горных пород в результате совокупного воздействия геологических, гидрометеорологических и геофизических факторов, возникновение, движение, разгрузку селя и формирование селевых отложений.

На разных этапах эволюции селевой геосистемы последовательно формируются потенциальный селевой массив, сель, селевые отложения.

Таким образом, селевой процесс можно описать как детерминированный упорядоченно-стохастический процесс, которому присуща внутренняя связь и непрерывность.

Области существования диссипативных структур в литологической компоненте (потенциальный селевой массив) селевой геосистемы и границы их устойчивости математически могут быть описаны как странные аттракторы методами теории катастроф [Арнольд, 1990].

Традиционно сель и потенциальный селевой массив описываются как разные объекты. Однако их правомерно описывать как разные стадии эволюции одного и того же объекта – литологической компоненты селевой геосистемы [Казаков, 2015].

Тогда формирование потенциального селевого массива, возникновение, движение и разгрузку селя можно рассматривать как разные стадии единого непрерывного процесса эволюции литологической компоненты селевой геосистемы при переходе её из неустойчивого состояния в устойчивое [Казаков, 2015] (рисунок 1).

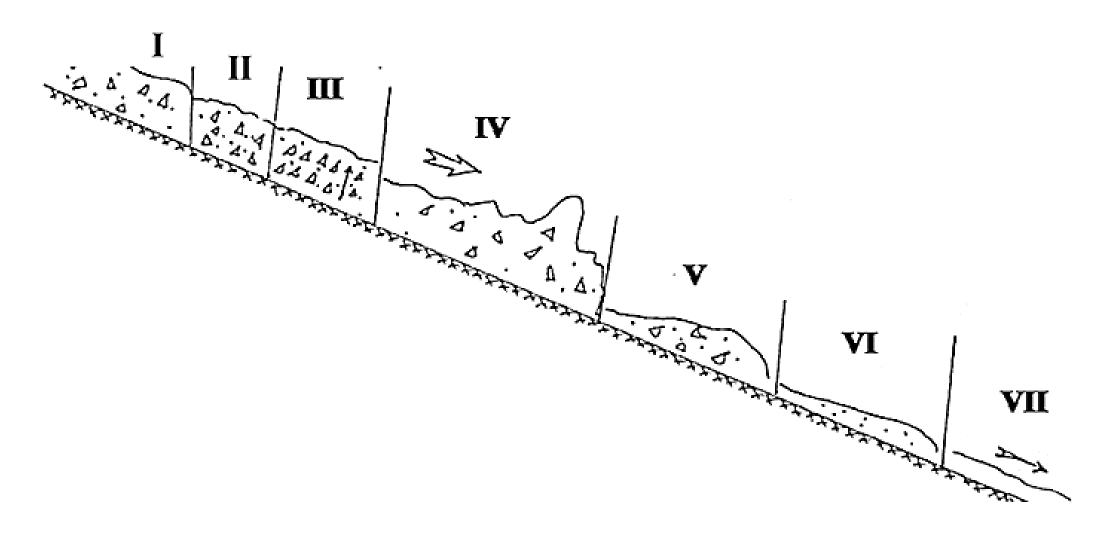


Рисунок 1. Самоорганизация упорядоченных структур в ходе эволюции селевой геосистемы. Стадии селевого процесса:

I – формирование массива рыхлообломочных пород в селевом очаге (седиментация);

II – формирование потенциального селевого массива (диагенез и морфогенез);

III – неравновесная (триггерная) стадия эволюции потенциального селевого массива;

IV – формирование и движение селя (динамический хаос);

V – торможение селя и формирование конуса выноса селя;

VI – формирование шлейфа тонкодисперсных селевых отложений (песчаных, супесчаных, глинистых);

VII – движение водной составляющей селя (послеселевой паводок)

Figure 1. The self-organization of ordered structures on evolution of debris-flow geosistem. Stages of debris-flow process:

I – formation of an massif of loose rocks in a debris-flow site (sedimentation);

II – formation of a potential debris-flow massif (diagenesis and morphogenesis);

III – nonequilibrium (trigger) stage of evolution of a potential debris-flow massif;

IV – formation and movement of a debris-flow (dynamic chaos);

V – braking of a debris-flow and formation of a debris-flow deposits;

VI – formation of a plume of fine debris-flow sediments (sandy, sandy loam, clay);

VII – movement the water component of the debris-flow (post- debris-flow flood)

В ходе эволюции селевой геосистемы в ней последовательно происходит самоорганизация диссипативных структур [Ebeling, 1976; Haken, 1983]: пространственно-неоднородных (отображаемых в структуре потенциального селевого массива); временных периодических (отображаемых в системе автоволн потенциального селевого массива);

пространственно-временных периодических (сель). Каждая стадия развития подсистемы «литологическая компонента» описывается как подсистемный уровень в селевой геосистеме, а смена стадий – как фазовые переходы с одного подсистемного уровня на другой [Казаков, 2015].

Процессы, ведущие к образованию упорядоченных структур, направлены на переход системы из хаотического состояния в упорядоченное и приводят к изменению её физических характеристик.

Смену стадий эволюции селевой геосистемы можно описать как переходы с одного подсистемного уровня геосистемы на другой – фазовые переходы [Казаков, 2019].

Методы исследования

В основу настоящей статьи положены результаты полевых исследований селевых процессов, проводившихся автором в 1978-2019 гг. на островах Сахалин, Парамушир, Шикотан, Кунашир, Итуруп, на Западном и Северном Кавказе, в Закавказье, на Кольском полуострове, в Восточной Сибири, в Забайкалье, Саянах и в Крыму. Исследовался гранулометрический, минералогический и химический состав селевых отложениях и потенциальных селевых массивов, геоморфологические и геоботанические признаки проявления селевых процессов. В работе с различной степенью полноты использованы данные исследований 817 сошедших селей, 145 шурфов и разрезов в селевых отложениях и потенциальных селевых массивах.

Анализ динамики селей выполнялся как на основе прямых наблюдений, так и по видеоматериалам (фильм о Чемолганском селевом эксперименте, а также материалы видеосъёмки селей в разных районах мира, размещённые в сети Интернет).

Результаты и их обсуждение. Селевая смесь как коллоидная система

Одним из важнейших вопросов, возникающих при исследовании селей, является вопрос о природе и физических свойствах селевой смеси.

Жидкая составляющая селя (в том числе, грязекаменного) – селевая смесь – часто описывается как «селевая суспензия» [Руководство…, 1990; Степанов, Степанова, 1991; Перов, 1996; Перов, 2012].

Однако с точки зрения физики суспензией связный сель не является, поскольку суспензия – это взвесь, двухфазная грубодисперсная система, состоящая из твёрдой дисперсной фазы и жидкой дисперсионной среды, в которой твёрдое вещество равномерно

распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном состоянии и со временем выпадает в осадок [Химический энциклопедический словарь, 1983].

Такая среда не способна переносить на большие расстояния глыбово-валунный материал, имеющий более высокую плотность, чем суспензия.

С точки зрения физики, жидкая среда плотностью 1500-1700 кг/м^3 не может переносить на большое расстояние валуны и глыбы плотностью 2100 кг/м^3 и более.

Сель, переносящий большие обломки горных пород, по своей сути не может быть несвязным, ибо транспортирующая среда должна либо иметь плотность, соизмеримую с плотностью переносимого материала, либо иметь большую вязкость, позволяющую переносить крупнообломочный материал внутри самой среды.

Перенос на достаточно большие расстояния валунно-глыбового материала водным потоком (сель как двухфазная система) не представляется возможным: реально происходит перемещение крупнообломочного материала как срыв самоотмостки русла на сравнительно короткое расстояние и преимущественно в придонной части потока. Такие сели могут описываться как несвязные (наносоводные).

По этой причине, термин *водо-каменный сель* представляет собой не более, чем оксюморон. Использование в классификационных схемах термина *водо-каменный сель* представляется избыточным и не соответствующим феноменологии селей.

Такое же мнение о правомерности выделения *водо-каменных селей* высказывали и другие исследователи [Флейшман, 1978; Виноградов, 1980].

В отложениях селей, определяемых как *водо-каменные*, как правило, обнаруживаются селевые обмазки, свидетельствующие о том, что «жидкая составляющая» селя реально была насыщена глинистыми частицами и представляла собой связную среду.

Кроме того, зачастую послеселевыми паводками из крупнообломочных селевых отложений вымывается большая часть мелкозёма, что приводит исследователей к ошибочному выводу о том, что глыбово-валунный материал переносился водным потоком.

Реальный связный сель (грязевой и грязекаменный) представляет собой условно однофазную систему, в которой вода находится преимущественно в молекулярно связанном состоянии, а грубообломочный материал распределён внутри самой системы.

Наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система, поскольку в связном селе частицы мелкозёма распределены в непрерывной дисперсионной среде и в осадок не выпадают. Такого же взгляда на природу связных селей придерживался С.М. Флейшман [Флейшман, 1978].

Коллоидная система при меньшей плотности способна удерживать во взвешенном состоянии внутри смеси глыбы и валуны большей плотности, чем вмещающая система.

Такое агрегатное состояние селевой смеси необходимо учитывать при физическом и математическом моделировании связных селей.

Самоорганизация пространственно-неоднородной упорядоченной структуры потенциального селевого массива накопления и коллоидные свойства селевой смеси обусловливаются физическими свойствами мелкозёма потенциального селевого массива, образующего вертикальные элементы его текстуры – кластеры глинистых агрегатов (рисунок 2).

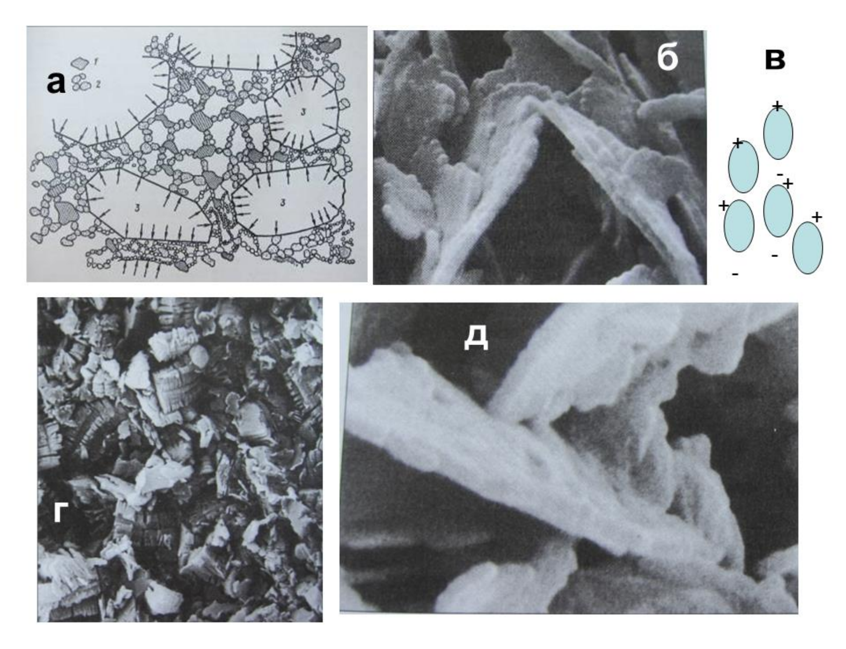


Рисунок 2. Пространственно-неоднородная упорядоченная структура потенциального селевого массива накопления: а, г – структура глины [Цытович, 1983]; б, д – вертикальный элемент текстуры потенциального селевого массива – кластер глинистых агрегатов [Осипов, Соколов, 2013]; в – электрические заряды на частицах глинистых минералов

Figure 2. Spatially heterogeneous self-organized structure of potential debris-flow massif of accumulation: а, г – structure of clay [Cytovich, 1983]; б, д – vertical texture element of potential debris-flow massif – cluster of clay aggregates [Osipov, Sokolov, 2013]; в – electric charges on particles of clay minerals

Образование фазовых контактов между глинистыми частицами обусловлено ионно-электростатическими силами (рисунок 3). Фазовые контакты обладают высокой прочностью, иногда превосходящей прочность самих контактирующих минералов [Осипов, 2012]. При плотном контакте глинистых частиц с молекулярно гладкими базисными поверхностями и

взаимном перекрытии частиц на значительной площади возможно образование фазового контакта за счёт ионно-электростатических связей.

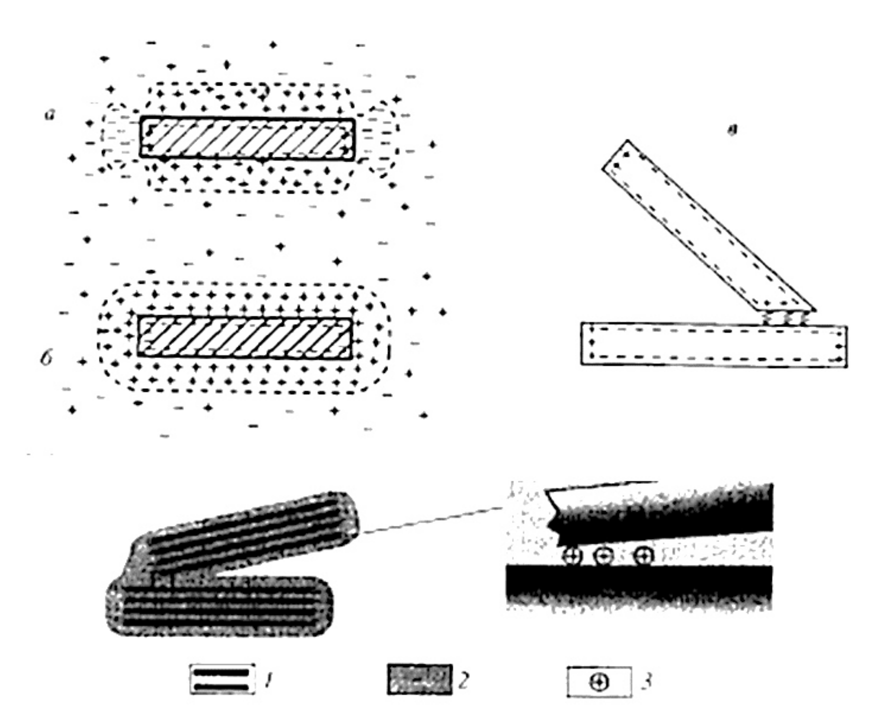


Рисунок 3. Силы электрического взаимодействия в потенциальном селевом массиве и в селевой смеси. Схема электростатического взаимодействия глинистых частиц (ионно-электростатическое взаимодействие глинистых частиц): 1 – глинистая частица; 2 – связанная вода; 3 – катионы, формирующие ионно-электростатические связи. [Осипов, 2012]

Figure 3. Forces of electrical interaction in a potential debris-flow massif and in a debris-flow mixture. Scheme of electrostatic interaction of clay particles (ion-electrostatic interaction): 1 – clay particle; 2 – bound water; 3 – cations forming ion-electrostatic bonds. [Osipov, 2012]

Таким образом, в селевой смеси, содержащей достаточное количество глинистых гидрофильных минералов, возникают условия для образования коллоидной системы, которую можно описать как условно однофазную систему, обладающую большой вязкостью и структурно однородную – способную переносить внутри себя обломки горных пород, плотность которых превышает плотность самого коллоида.

По мнению С.М. Флейшмана [Флейшман, 1978], для придания водно-грунтовой системе, обладающей коагуляционной структурой, коллоидных свойств, необходимых для придания грунтовой массе связности и других структурно-механических свойств, присущих структурированным коагуляционным системам, достаточно содержания в системе 8-10%

тонкодисперсных фракций по отношению к грубодисперсным гидрофобным песчаным крупнообломочным фракциям.

В 2008-2010 гг. нами проводились исследования гранулометрического, минералогического и химического состава мелкодисперсной фракции селевых отложений в селевых бассейнах на восточном побережье Южного Сахалина, на о. Парамушир, в бассейне р. Мзымта (Западный Кавказ) и в бассейне р. Герхожан-Су (Северный Кавказ). Исследования показали, что в составе мелкодисперсной фракции отложений грязекаменных селей дождевого генезиса повсеместно выделяется большое содержание в составе мелкозёма пылеватых частиц (не менее 14% фракций <0,05 – 0,002 мм), значительного содержания агрегированных тонкоглинистых фракций (<0,001 мм), гидрослюд и монтмориллонита [Казаков и др., 2012] (Таблица 1).

Важно отметить, что в отложениях грязекаменных селей повсеместно (в разных географических районах) наблюдается такое высокое содержание пылеватых частиц, агрегированных тонкоглинистых фракций, гидрослюд и монтмориллонита: даже в тех случаях, когда гранулометрический состав селевых отложений описывается как *супесь*.

По нашему мнению, именно этим обстоятельством и объясняются физическое состояние селевой смеси как коллоидной системы и, соответственно, условия для формирования связных грязекаменных селей.

Затем, при исследовании селевых отложений исследователи, как правило, упускают из вида это обстоятельство, и, определив гранулометрический состав селевых отложений как *супесь,* приходят к ошибочному выводу о том, что прошедший сель был несвязным – *водокаменным*.

Именно этими характеристиками пород обуславливаются структурно-реологические характеристики связных селей: в частности, способность связных селей переносить на большое расстояние валунно-глыбовый материал, формируя грязекаменные потоки большого объёма, и возникновение периодических волн при движении селя.

Высокое содержание пылеватых частиц и тонкоглинистой фракции с преобладанием гидрофильных минералов обуславливает преимущественно связное состояние воды в селевой смеси. В этом состоянии селевая смесь может описываться как однофазная система.

Такая система обладает высокой плотностью и, соответственно, высокой транспортирующей способностью, чем и обеспечивается перенос валунно-глыбового материала на большие расстояния внутри селевой смеси и, собственно, формирование грязекаменных селей.

Таблица 1. Гранулометрический и минералогический состав мелкодисперсной части селевых отложений и рыхлообломочных пород потенциальных селевых массивов.

Table 1. Granulometric and mineralogical composition of fine-dispersed part of the debris-flow deposits and a loose rock of potential debris-flow massifs.

Адрес Address	Гранулометрический состав Granulometric composition	Плотность минеральной части, г/см^3 Density of mineral part, g/cm^3	Содержание пылеватых частиц <0,05-0,002 мм, %% Content of dusty particles <0.05-0.002 mm, %%	Содержание фракции <0,002 мм, %% The contents of the faction <0.002 mm, %%	Содержание тонкоглинистой фракции <0,001 мм, %% Content of fine clay fraction <0.001 mm, %%	Реальная глинистость (содержание фракции <0,002 мм в свободном состоянии и в составе агрегатов), %% The actual clay content on (the content of fraction <0.002 mm in the free state and in the composition of the units) , %%	Агрегированность (общее количество агрегатов), %% The degree of aggregation (total number of units), %%	Преобладающий минеральный состав тонкоглинистой фракции (<0,001 мм) Predominant mineral composition of fine-dispersed clayey fraction (<0.001 mm)
р. Мзымта, Западный Кавказ Mzymta River, Western Caucasus	Супесь Clay sand	2,53	18,2	3,1	7,0	8,1	5,3	Гидрослюды Illite
р. Герхожан-Су, Северный Кавказ Gerkhozhan-Su River, North Caucasus		2,52	25,8	7,6	10,2	11,2	9,2	
р. Можайка, Южный Сахалин Mozhaika River, Southern Sakhalin		2,42	14,4	3,2	11,3	13,0	30,8	

Фазовые переходы в селевой геосистеме

Рассматривая эволюцию селевой геосистемы как непрерывный процесс [Казаков, 2015], включающий в себя последовательность стадий её эволюции (формирование массива рыхлообломочных горных пород в селевом очаге в результате геологических процессов, трансформация его в потенциальный селевой массив вследствие его диагенеза и морфогенеза, возникновение и движение селя, разгрузка крупнообломочного и затем – тонкодисперсного материала и прохождение селевого паводка), можно описать каждую стадию эволюции селевой геосистемы как переход с одного подсистемного уровня на другой, а смену состояний системы, обусловленную физическими процессами, происходящими внутри системы, – как фазовые переходы.

Фаза представляет собой термодинамически равновесное состояние веществ – *фазовое состояние* (потенциальный селевой массив – сель – селевые отложения).

Переход вещества из одного фазового состояния в другое – *фазовый переход I рода* – связан с качественным изменением свойств вещества при переходе системы из одного агрегатного состояния в другое и сопровождается скачкообразным изменением структуры и свойств (плотности, теплоёмкости, внутренней энергии, энтропии и др.) [Физический энциклопедический словарь, 1983].

При переходах селевой геосистемы с одного уровня на другой изменяется агрегатное состояние системы: твёрдое вещество – коллоид – жидкая среда – твёрдое вещество (рисунок 4).

При этом изменяются и физические характеристики системы: в первую очередь, плотность (потенциальный селевой массив – сель – селевые отложения).

Вопрос об изменении теплоёмкости, внутренней энергии и других физических параметров при трансформации потенциального селевого массива в сель не исследован и остаётся открытым.

При переходах селевой геосистемы с одного уровня на другой (потенциальный селевой массив – сель – селевые отложения) изменяется также энтропия системы как параметр, описывающий её как информационную систему [Haken, 1983]: изменяется степень упорядоченности системы и тип её структуры [Казаков, 2015].

Наиболее важными представляются переходы из твёрдого состояния (потенциальный селевой массив как условно однородное твёрдое тело, обладающее внутренней структурой) в связный селевой поток (квазижидкое состояние) и затем из квазижидкого – вновь в твёрдое

при остановке селя и формировании селевых отложений (при этом происходит разделение твёрдого и жидкого вещества и удаление последнего за пределы селевого конуса выноса).

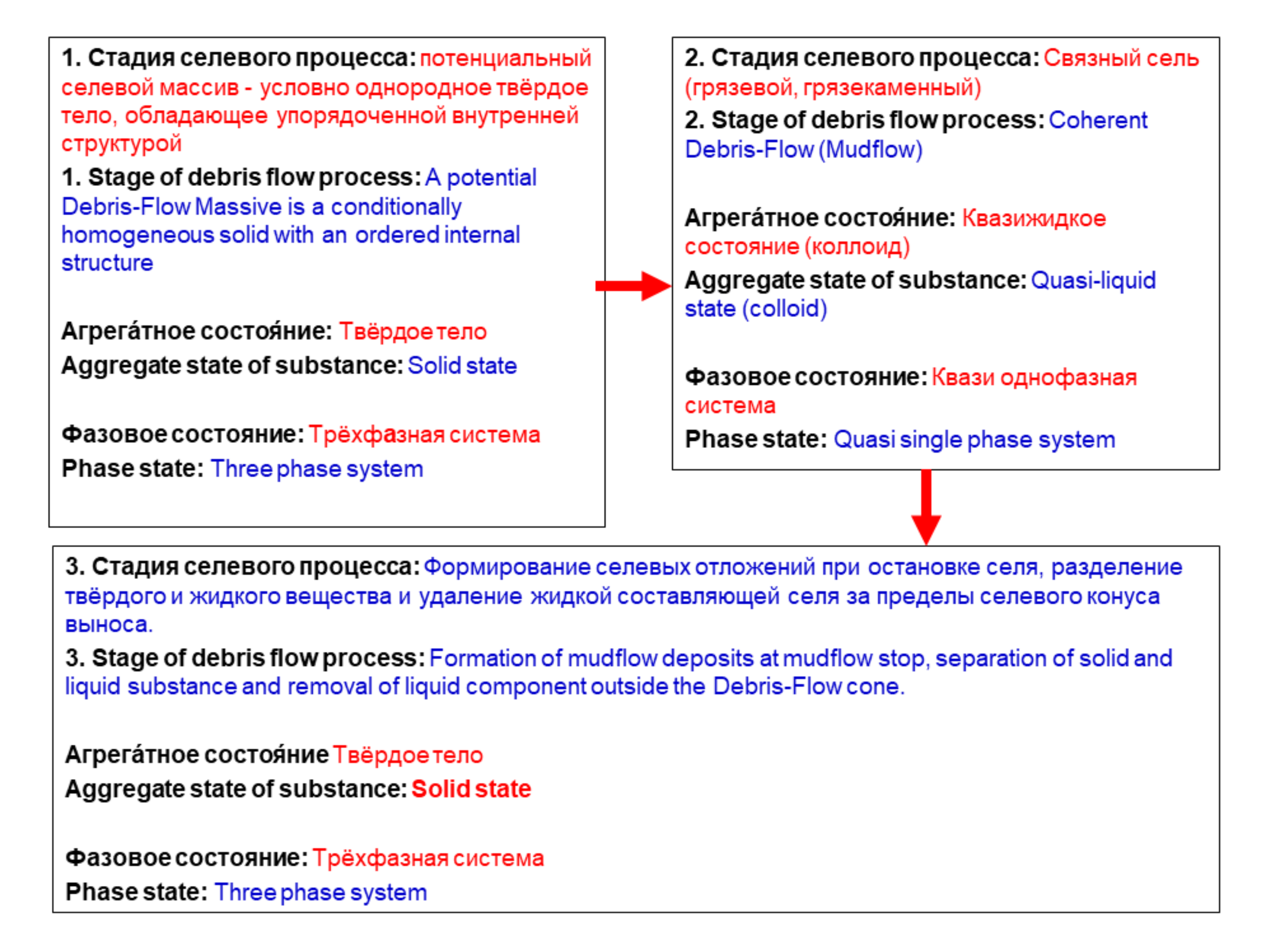


Рисунок 4. Фазовые переходы в селевой геосистеме

Figure 4. Phase transitions in the debris flow geosystems

Эволюция потенциального селевого массива и его переход в другое фазовое состояние обусловливаются не только внешними (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними факторами: прежде всего, минералогическим составом горных пород потенциального селевого массива, наиболее важным из которых является наличие в составе пород тонкодисперсных глинистых частиц и гидрофильных минералов.

С этой точки зрения, важнейшим параметром, обусловливающим как связность грунтов потенциального селевого массива, так и способность его трансформации в коллоидную систему, и позволяющим построить физическую модель селевого процесса, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (грунтовыми частицами), обеспечивающие энергию связи между ними [Цытович, 1983; Охотин, 2008; Осипов, 2012; Осипов, Соколов, 2013].

Выводы

1. Эволюция литологической компоненты селевой геосистемы – непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур, сопровождающийся сменой равновесных и неустойчивых состояний системы, обусловленной физическими процессами, происходящими внутри системы. Переходы системы с одного подсистемного уровня на другой являются фазовыми переходами I рода.

2. При фазовых переходах в литологической компоненте селевой геосистемы изменяется её агрегатное состояние (твёрдое вещество – коллоид – жидкая среда – твёрдое вещество). Процесс сопровождается скачкообразным изменением структуры и свойств системы и изменением её физических характеристик: в первую очередь, плотности (потенциальный селевой массив – сель – селевые отложения).

3. Наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система. Именно это агрегатное состояние селевой смеси определяет его динамику, что необходимо учитывать при физическом моделировании связных селей. Селевая смесь в связном селе является не суспензией, а коллоидной системой, которая способна при меньшей плотности удерживать во взвешенном состоянии внутри смеси глыбы и валуны большей плотности, чем вмещающая система.

4. Использование термина *водо-каменный сель* представляется избыточным и не соответствующим феноменологии селей, поскольку жидкая среда плотностью 1500-1700 кг/м^3 не может переносить на большое расстояние валуны и глыбы плотностью 2100 кг/м^3 и более. Сель, переносящий большие обломки горных пород, не может быть несвязным, ибо транспортирующая среда должна либо иметь плотность, соизмеримую с плотностью переносимого материала, либо иметь большую вязкость, позволяющую переносить крупнообломочный материал внутри самой среды.

5. Важнейшим параметром, обусловливающим связность грунтов потенциального селевого массива и способность его трансформации в коллоидную систему, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (грунтовыми частицами).

6. Эволюция потенциального селевого массива и его перехода в другое фазовое состояние обусловливаются не только внешними (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними факторами: минералогическим составом горных пород

потенциального селевого массива, наиболее важным из которых является наличие в составе пород тонкодисперсных глинистых частиц и гидрофильных минералов.

7. В отложения грязекаменных селей в разных географических районах наблюдается высокое содержание пылеватых частиц, агрегированных тонкоглинистых фракций, гидрослюд и монтмориллонита: даже в тех случаях, когда гранулометрический состав селевых отложений описывается как *супесь*. Этим объясняется преимущественное физическое состояние селевой смеси как коллоидной системы: то есть условий для формирования связных грязекаменных селей. При исследовании селевых отложений исследователи упускают из вида это обстоятельство, и, определив гранулометрический состав селевых отложений как *супесь,* приходят к ошибочному выводу о том, что прошедший сель был несвязным: *водо-каменным*.

8. Описание селевого процесса как цепи фазовых переходов, а селевой смеси как коллоидной системы открывает новые принципиальные подходу к разработке мер противоселевой защиты. Воздействуя на потенциальный селевой массив и связный сель искусственными электрическими полями, можно изменять агрегатное состояние системы и, соответственно, динамику селевого процесса.

Литература

Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.

Казаков Н.А. Селевой процесс как цепь фазовых переходов // Тезисы докладов III Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (г. Южно-Сахалинск, 27-31 мая

References

Arnol'd V.I. *Teoriya katastrof [The theory of catastrophes]*. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 128 p. (In Russian).

Ebeling W. *Strukturbildung bei Irreversiblen Prozessen – Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen.* Leipzig, Publ. BSB Teubner, 1976. 194 p. (Russ. ed. *Obrazovanie struktur pri neobratimykh protsessakh. Vvedenie v teoriyu dissipativnykh struktur*. Moscow, Publ. Mir, 1979. 280 p.)

Fleishman S.M. *Seli [Mudflow]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Haken H. *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems.* Berlin, Heidelberg: Springer, Ser. Sinergetics, vol.40. 1983. 258 p. (Russ. ed.:

2019 г.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 140.

Казаков Н.А. Эволюция селевой геосистемы как процесс самоорганизации упорядоченных структур // Георискъ. 2015. № 2. С. 28-30.

Казаков Н.А., Рященко Т.М., Генсиоровский Ю.В., Ухова Н.Н. Состав пород потенциальных селевых массивов как фактор, определяющий структурно-реологический тип селевого потока // Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», посвященной 100-летию С.М. Флейшмана (г. Москва, 17-19 октября 2012 года) / Отв. ред. С.С. Черноморец. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 45-46

Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 72 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства: состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.

Охотин В.В. Грунтоведение. СПб: Центр генетического грунтоведения, 2013. 231 с.

Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya. Makroskopicheskii podkhod k slozhnym sistemam.* Moscow, Mir Publ., 1991. 240 p.)

Kazakov N.A. Selevoi protsess kak tsep' fazovykh perekhodov [Mudflow process as a chain of phase transitions]. *Tezisy dokladov Tret'ei Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy» (g. Yuzhno-Sakhalinsk, 27-31 maya 2019 g.) [Abstracts of the Third National scientific conference with foreign participants "Geodynamical Processes and Natural Hazards" (Yuzhno-Sakhalinsk, 27-31 of May 2019)]*. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. IMGG FEB RAS, 2019. P. 140. (In Russian).

Kazakov N.A. Evolyutsiya selevoi geosistemy kak protsess samoorganizatsii uporyadochennykh struktur [Evolution of the debris-flow geosystem as process of self-organization of the ordered structures]. *Georisk [Georisk]*, 2015, No 2, pp. 28-30, 60. (in Russian; summary in English)

Kazakov N.A., Ryashchenko T.M., Gensiorovskiy Y.V., Ukhova N.N. Sostav porod potentsial'nykh selevykh massivov kak faktor, opredelyayushchii strukturno-reologicheskii tip selevogo potoka [Rock composition of potential debris-flows massives as a factor defining structural and rheological type of debris flows]. *Trudy Vtoroi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita», posvyashchennoi 100-letiyu S.M. Fleishmana (g. Moskva, 17-19 oktyabrya 2012 goda) [Proceedings of the Second Conference «Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection» dedicated to 100th anniversary of S.M. Fleishman (Moscow, October 17-19, 2012)].* Moscow, Publ. Geograficheskii fakul'tet MSU, 2012, pp. 45-46. (In Russian).

Перов В.Ф. Селеведение: учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Перов В.Ф. Селевые явления: терминологический словарь. М.: Издательство Московского университета, 1996. 45 с.

Руководящий документ РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеоиздат, 1990. 200 с.

Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.

Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей: эксперимент, теория, методы расчета. М.: Гидрометеоиздат, 1991. 379 с.

Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 312 с.

Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Пер. с

Knunyants I.L. *Khimicheskii entsiklopedicheskii slovar' [Chemical Encyclopedic Dictionary].* Moscow, Publ. of Soviet Encyclopedia, 1983. 791 p. (In Russian).

Okhotin V.V. *Gruntovedenie [Soil science]*. St. Peterburg, Publ. of Center for Genetic Soil Science, 2013. 231 p. (In Russian).

Osipov V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh [Physicochemical theory of effective stresses in soils]*. Moscow, Publ. IFZ RAN, 2012. 72 p. (In Russian).

Osipov V.I., Sokolov V.N. *Gliny i ikh svoistva: sostav, stroenie i formirovanie svoistv [Clays and their properties: composition, structure and formation of properties]*. Moscow, Publ. GEOS, 2013. 575 p. (In Russian).

Perov V.F. *Selevedenie: uchebnoe posobie*. Moscow, Moscow University Press, 2012. 272 p. (In Russian).

Perov V.F. *Selevye yavleniya: terminologicheskii slovar' [Mudflows: a terminological dictionary]*. Moscow, Moscow University Press, 1996. 45 p. (In Russian).

Prokhorov A.M. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar' [Physical Encyclopedic Dictionary]* Moscow, Publ. of Soviet Encyclopedia, 1983. 928 p. (In Russian).

Rukovodyashchii dokument RD 52.30.238-90. Rukovodstvo selestokovym stantsiyam i gidrograficheskim partiyam. Vypusk 1. Organizatsiya i provedenie rabot po izucheniyu selei [Guiding document RD 52.30.238-90. Management of mudflow runoff stations and hydrographic parties. Issue 1. Organization and conduct of work on the study of mudflows]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 200 p. (In Russian).

англ. Ю.А. Данилова. М.: Мир, 1991. 240 с.

Химический энциклопедический словарь / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1983. 791 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур / Пер. с нем. А.С. Доброславского; под ред. Ю.Л. Климонтовича М.: Мир, 1979. 280 с.

Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh [Introduction to the doctrine of geosystems]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1978. 319 p. (In Russian).

Stepanov B.S., Stepanova T.S. *Mekhanika selei: eksperiment, teoriya, metody rascheta [Mudflow mechanics: experiment, theory, calculation methods]*. Moscow, Publ. Gidrometeoizdat, 1991. 379 p. (In Russian).

Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): uchebnik dlya stroit. Vuzov [Soil mechanics (short course): a textbook]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (In Russian).

ЭВОЛЮЦИЯ ГИДРОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

THE EVOLUTION OF THE EARTH'S HYDROSPHERE

УДК 556

DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.002

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1], Д.А. Субетто[3], М.М. Кадацкая[1], И.А. Виноградов[1]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия; [3]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. Исследования изменений уровня озера Ильмень важны для изучения развития речной сети в его бассейне, так как он является базисом эрозии для них. Цель работы состояла в оценке уровенного режима озеро Ильмень в течение голоцена, включая современный период. Уровенный режим озера определяется не только поступлением вод с водосбора, но и регулируется стоком вытекающей из него реки Волхов, который до строительства 1926 году Волховской ГЭС зависел от отметок Пчевских и Велецких порогов в низовьях реки.

THE WATER LEVEL REGIME OF LAKE ILMEN

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Viktor A. Obyazov[1], Dmitriy A. Subetto[3], Mariya M. Kadatskaya[1], Ivan A. Vinogradov[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia
[3]Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. Researches of changes in the water level of Lake Ilmen are important for studying the development of the river network in its basin, since it is the basis of erosion for them. The purpose of the work was to assess the level regime of Lake Ilmen during the Holocene, including the modern period. The level regime of the lake is determined not only by the inflow of waters from the catchment, but is also regulated by the runoff of the Volkhov River flowing out of it, which, which prior to the construction of the Volkhov Hydroelectric Power Station in 1926, depended on the marks

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Subetto D.A., Kadatskaya M.M., Vinogradov I.A. The water level regime of Lake Ilmen. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 190-218 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.002

В течение голоцена Пчевские и Велецкие пороги размывались рекой Волхов, в результате чего их отметки понижались. Выполнена ориентировочная реконструкция изменения отметок порогов в зависимости от увлажненности климата в предыдущие столетия. Оценка той или иной степени увлажнения климата за столетний/тысячелетний период достаточно условна и принималась как отношение количества дождливых годов к годам с засухами на основании летописных данных. К началу нашей эры минимальный уровень озера находился на отметках не ниже 19,5 м. Максимальный уровень, учитывая схожесть климата с последними столетиями, скорее всего, не превышал отметки в 24,5 м, то есть амплитуда уровней была меньше современной. Начиная со второй половины первого тысячелетия до наших дней, уровенный режим озера определялся только климатическими особенностями.

На основании того, что минимальные отметки дна некоторых рек, в частности Ловати, Мсты и Шелони, впадающих в Ильмень, находятся не только ниже минимального уровня озера, но и минимальных отметок его дна, можно сделать предварительный вывод, что уровень озера Ильмень в прошлом был несколько ниже, нежели в настоящее время и составлял современные 16-17 м балтийской системы.

of the Pchevsky and Veletsky rapids in the downstream.

During the Holocene, the marks of the Pchevsky and Veletsky rapids were decreasing, because they been eroded by the Volkhov River. An approximate reconstruction of the change in rapids marks has been carried out, depending on the humidity of the climate in previous centuries. Evaluation of a varying degree humidification over a century / millennium is rather arbitrary and was taken as the ratio of the number of rainy years to years with droughts based on annals data. By the beginning of our era, the minimum water level of the lake was not less than 19.5 m. The maximum water level most likely did not exceeding the mark of 24.5 m, considering the similarity of climate to the last centuries, that is, the amplitude of the water levels was less than modern. Only climatic features determined the water level regime of the lake starting from the second half of the first millennium to the present day.

On the grounds of the fact that the minimum bottom marks of some rivers, flowing into lake Ilmen (in particular Lovat', Msta and Shelon'), are lower not only than the minimum water level of the lake, but also than the minimum marks of its bottom, we can do a preliminary conclusion that the water level of Lake Ilmen in the past was rather lower than at present and was at modern mark of 16-17 m Baltic system.

Ключевые слова: уровенный режим; озеро Ильмень; река Волхов; Пчевские пороги; Велецкие пороги; базис эрозии; скорость размыва.

Keywords: level mode; Lake Ilmen; Volkhov River; Pchevsky rapids; Veletsky rapids; erosion basis; erosion rate

Введение

Развитие речной сети бассейна оз. Ильмень во многом зависит от уровня стояния его вод, являющимся для притоков базисом эрозии. Поскольку эти реки возникли лишь после Валдайского оледенения около 15-12 тыс. л.н. [Виноградов, Обязов, Кадацкая, 2019], они продолжают активно разрабатывать свой продольный профиль. В связи с этим представляется важным выполнить оценку изменения уровня озера в течение голоцена, включая современный период.

Объект исследования

Озеро Ильмень расположено в Новгородской области России и представляет собой обширный водоем, площадь которого при наивысших уровнях (≈23,5 м Балтийской системы (далее – БС)) составляет более 2000 км^2. При этом максимальная его глубина при таких отметках не превышает 10 м, при средних уровнях озера – около 18,5 м БС – она близка 5 м.

Уровенный режим озера Ильмень

Уровенный режим озера определяется не только поступлением вод с водосбора, но и регулируется стоком вытекающей из него река Волхов, который до строительства 1926 г. Волховской гидроэлектростанции (далее – ГЭС) регулировался отметками Пчевских и Велецких порогов в низовьях реки.

Пороги образовались в месте пересечения с рекой Силурийского глинта. С 1926 г. они затоплены в результате подпора от плотины Волховской ГЭС, расположенной на реке Волхов в 26,5 км от её впадения в Ладожское озеро. Первоначальный нормальный подпорный уровень (далее – НПУ) Волховского водохранилища – 15,74 м БС (после реконструкции – 17,25 м, форсированный – 17,9 м, уровень мертвого объема (УМО) – 14,7 м БС[1]). При уровнях у

[1] Волховское водохранилище [Электронный ресурс] // Федеральное агентство водных ресурсов. URL: http://voda.mnr.gov.ru/reservoirs/detail.php?ID=7330

плотины выше 17 м подпор распространяется до озера Ильмень, минимальные отметки дна которого составляют 13,3 м БС.

Общая длина реки Волхов – 224 км. У с. Пчева (74-й км от Ладожского озера) река (рисунок 1) врезается в глинистые известняки девонского возраста, ширина русла реки Волхов в этом месте достигает 400-450 м. Между с. Пчева и с. Подсопье (62-й км) находятся Пчевские пороги, которые состоят из 8 каменистых гряд: Меньшаковская, Братана, Волынская, Сухая, Дворцовая, Князьковская, Верхняя и Нижняя Никольские (рисунок 1). Общая длина участка 13 км. Наименьшие глубины до 0,5 м наблюдались до строительства ГЭС на Меньшаковской гряде.

Ниже с. Гостинополье (36-й км) русло проходит через трудноразмываемые силурийские известняки, его ширина на этом участке составляет около 400 м. На 35-м км у с. Вельцы начинаются Велецкие пороги (рисунок 2), которые в настоящее время перекрыты подпором от Волховской ГЭС. Минимальная глубина при УМО водохранилища составляет 1,3 м.

Общий вид расположения порогов на реке Волхов показаны на рисунке 3.

Изменение отметок дна порогов по данным промеров за различные годы представлено в таблице 1.

Таблица 1. Изменение отметок дна порогов, м БС[2]

Table 1. Changes of bottom marks of thresholds, m of the Baltic system

Створ	1886	1924	1959	1975	размыв за 38 лет
Меньшаковская гряда Пчевских порогов	13,91	13,87	14,60	13,80	0,11
Сухая гряда (п. Тихорицы)	13,76	13,68	14,11	13,70	0,08
Велецкие пороги	13,50	13,55	12,46	13,50	0,00

[2] *Карта озера Ильменя*, истока р. Волхова с устьем р. Мсты, устья р. Ловати с р. Полистью и устья р. Шелони, исследованных Ильменскою и Molого-Мстинскою описными партиями Министерства Путей Сообщения СПб: тип. Ильина, 1886. 59 л.
Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
Лоция реки Волхов (второе издание). Ленинград, 1959. 40 с.
Лоция реки Волхов. Ленинград, 1975. 102 с.

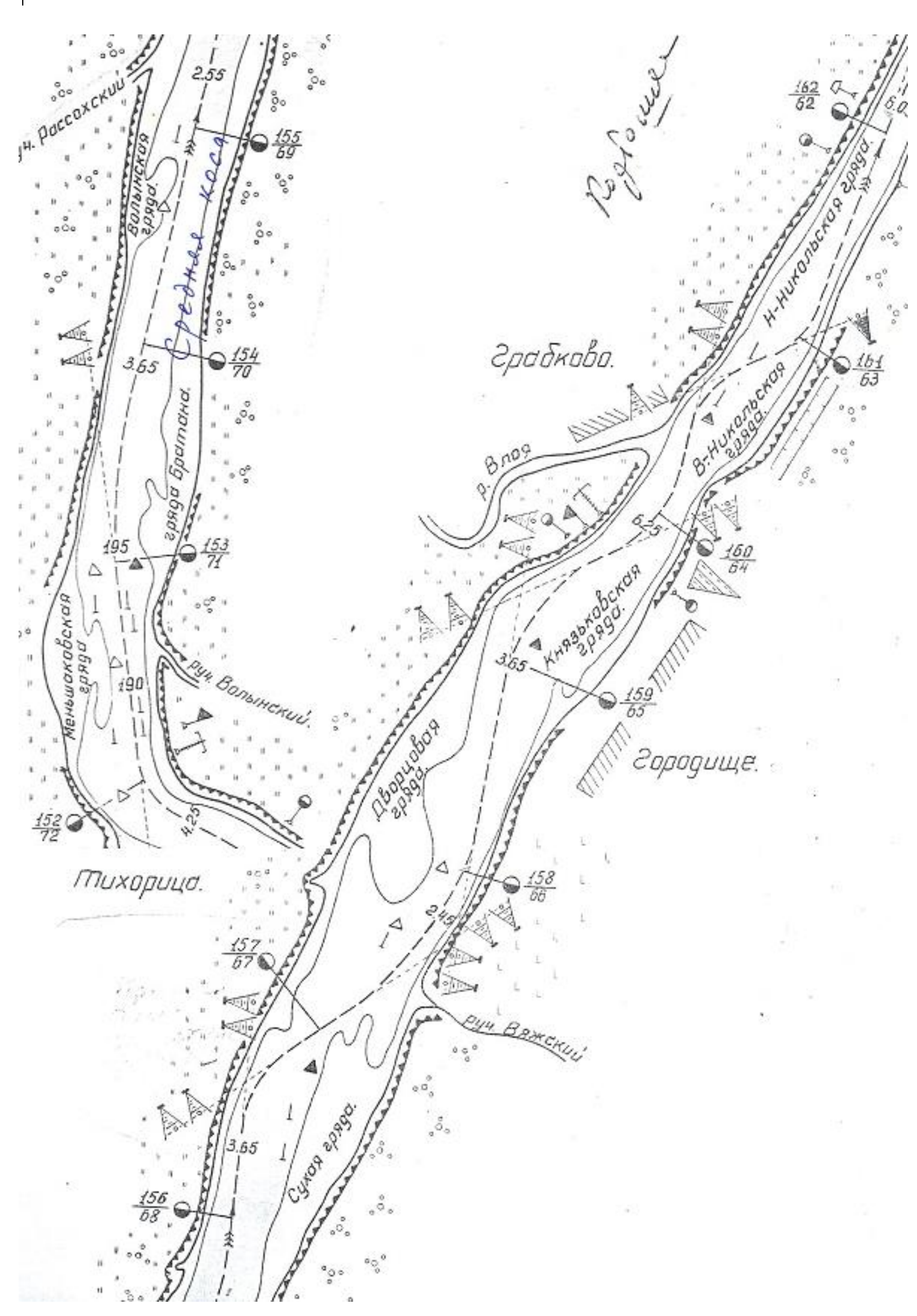


Рисунок 1. Пчевские пороги, 62-74 км от Ладожского озера[3]

Figure 1. Pchevsky rapids, 62-74 km from Lake Ladoga

[3] *Лоция реки Волхов* (второе издание). Ленинград, 1959. 40 с.

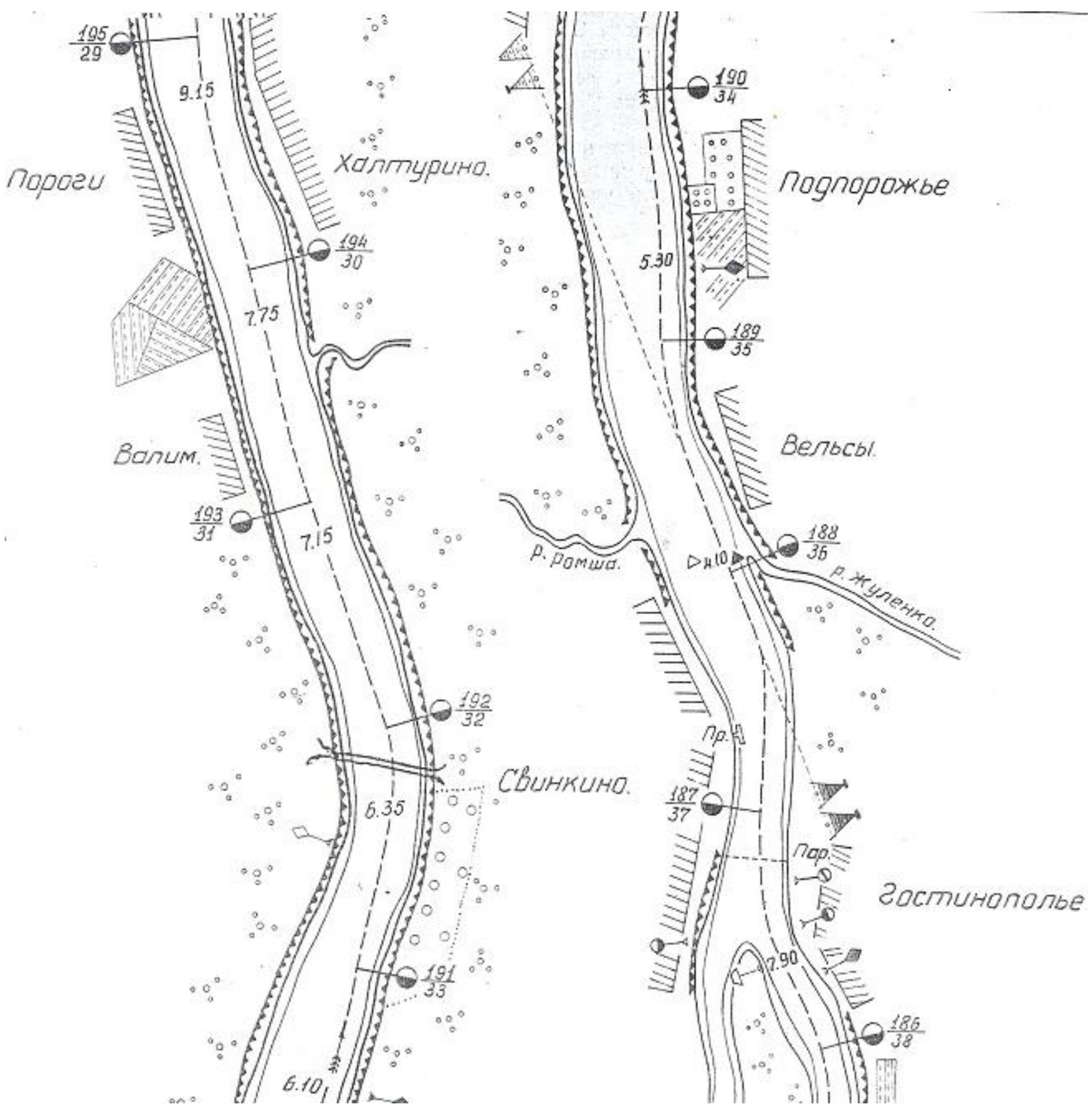


Рисунок 2. Велецкие пороги, 29-38 км от Ладожского озера[4]

Figure 2. Veletsky rapids, 29-38 km from Lake Ladoga

[4] Там же

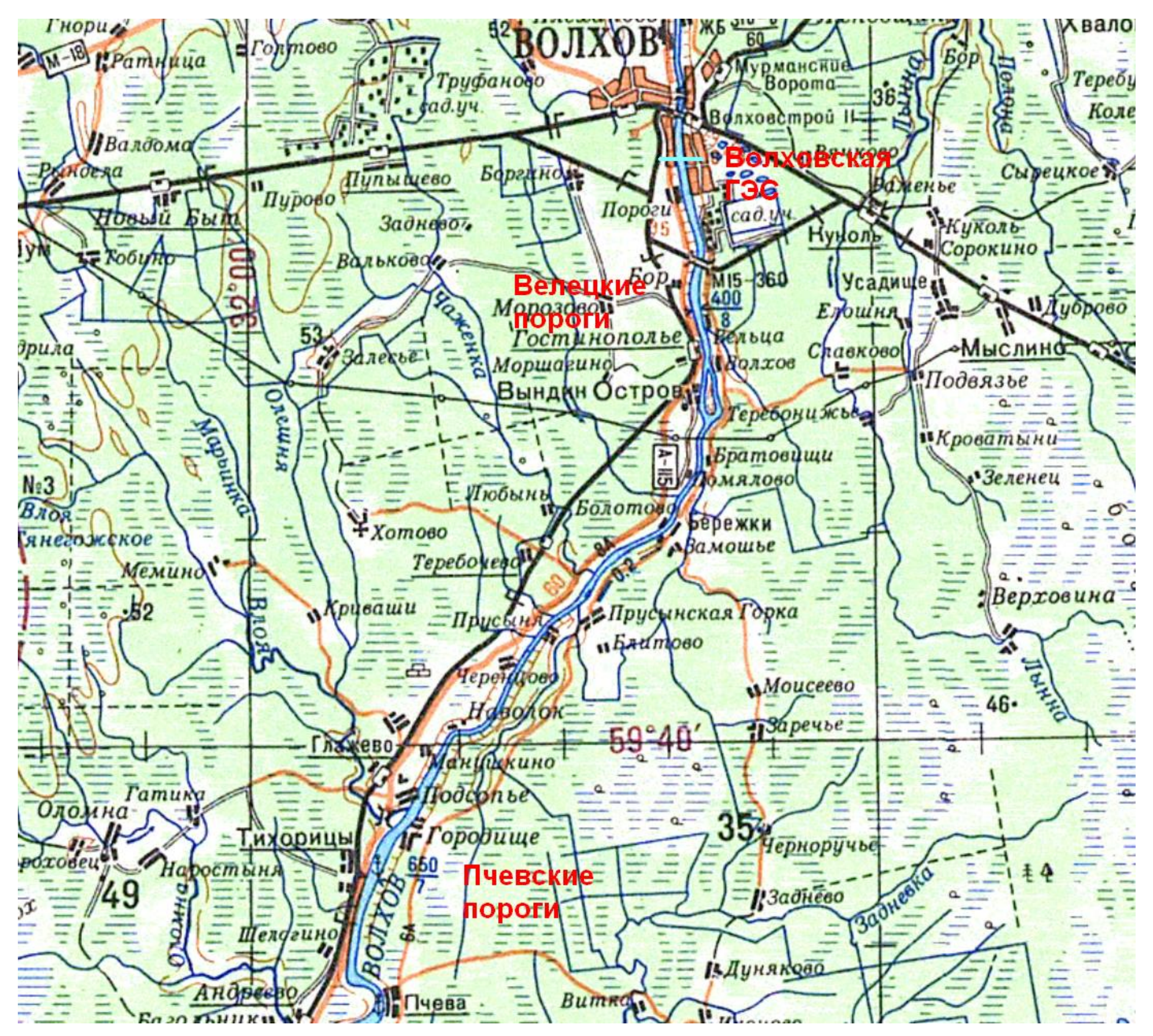


Рисунок 3. Местоположение Пчевских и Велецких порогов на реке Волхов[5]

Figure 3. Location of the Pchevsky and Veletsky rapids on the Volkhov River

По данным 1959 г. наблюдается увеличение отметок дна на Меньшаковской и Сухой грядах, что скорее всего связано с занесением порогов наносами вследствие подпорных явлений от Волховской ГЭС. Из общей картины выпадает отметка Велецких порогов за тот же год, что может быть вызвано проведением дноуглубительных работ и последующим заилением судового хода.

Для приблизительной оценки изменения отметок лимитирующего порога оценим суммарную скорость размыва и эндогенного опускания в 0,2-0,4 м в столетие.

[5] Топографическая карта: лист О-36-001: масштаб 1:500 000. Генеральный штаб, 1988

Рассмотрим размываемый участок дна единичной площади мощностью *h*. На него действуют сдвигающие напряжения [Виноградов, 1980]:

- от толщи водной массы:

$$\rho_в gH \cdot \sin\alpha ;$$

- от массы породы, слагающей дно (аллювиальные отложения или местный водоупор):

$$(\rho_г - \rho_в)(1-\varepsilon)gh \cdot \sin\alpha ;$$

- касательное движущегося турбулентного потока:

$$\frac{g}{C^2}\rho_в V^2$$

где V – средняя скорость потока;

C – коэффициент Шези [Барышников, Попов, 1988]:

$$C = \frac{1}{n}R^{1,3\sqrt{n}},$$

где n – коэффициент шероховатости;

R – гидравлический радиус, м.

- от влекомых и взвешенных наносов в придонном слое глубиной h_n с средней плотностью частиц $\rho_г$ [Петров, Потапов, 2014]:

$$h_n k \rho_г g \sin\alpha$$

где k – концентрация наносов в единице объема;

- механическое воздействие потока на неровности дна. Модуль силы, воздействующий на неровность:

$$F = \rho_в S V^2,$$

откуда сдвигающее напряжение на препятствие площадью S [Зубов, 1978]:

$$\tau_м = \rho_в S V^2 / S = \rho_в V^2,$$

где S – фронтальная площадь препятствия, на которую воздействует поток, м²;

V – придонная скорость потока, м/с:

$$V_{прд} = V_{ср} \frac{\lg(16{,}7 \cdot y / \Delta + 1)}{\lg 6{,}15 \cdot h / \Delta};$$

где y – ордината по оси, перпендикулярной поверхности дна потока, м;

Δ – высота выступов шероховатости, м [Гришанин, 1969].

Напряжение, препятствующее сдвигу, выражаются следующей зависимостью:

$$\tau_{уд} = (\rho_г - \rho_в)(1 - \varepsilon) gh \cdot \cos\alpha \cdot tg\varphi + c,$$

где φ – угол внутреннего трения,

c – удельное сцепление донного грунта,

ε – пористость.

Сдвиг (смыв) рассматриваемого участка произойдет в тот момент, когда сдвигающие напряжения превысят удерживающие:

$$\rho_в g H \cdot \sin\alpha \cdot S + (\rho_г - \rho_в)(1 - \varepsilon) gh \cdot \sin\alpha + \frac{g}{C^2} \rho_в V^2 + h_n k \rho_г g \cdot \sin\alpha + \rho_в V^2 \geq \geq (\rho_г - \rho_в)(1 - \varepsilon) gh \cdot \cos\alpha \cdot tg\varphi + c \quad (1)$$

Параметры силурийских известняков:

- плотность в естественном залегании – 2,44 т/м³;
- объемная влажность увлажненных известняков – 8,3%;
- предел прочности на одноосное сжатие переувлажненных известняков принимается равным 16,25 МПа[6] (по данным 1912 г. – 29,22[7]);
- предел прочности на растяжение – 3,5 МПа [Чувардинский, 1998];

[6] ГОСТ 9479-98. Межгосударственный стандарт. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий. Технические условия (таблица 3)

[7] Палицын Е.А. Озеро Ильмень и река Волхов в связи с проектом шлюзования и использования энергии падения воды. СПб.: Типография Министерства путей и сообщения т-ва И. Н. Кушнерев и К°, 1912. 370 с.

- предел прочности на сдвиг рассчитан по зависимости Мерша [Шашенко, Пустовойтенко, Сдвижкова, 2015]:

$$R_c = 0{,}5\sqrt{R_{сж;}R_{раст}} = 3{,}8 \text{ МПа};$$

- интенсивность сил сцепления [Нескоромных, 2015] рассчитывается по зависимостям:

$$c = \frac{R_{сж}(1-\sin\varphi)}{2\sin\varphi} \qquad c = \frac{R_{раст}(1+\sin\varphi)}{2\sin\varphi} \qquad c = \sqrt{\frac{R_{сж}}{R_{раст}}+1}-1$$

В результате расчетов, при условии, что для не мерзлых известняков угол внутреннего трения близок к 40 град, сцепление составляет 4,48 МПа или 45,7 кг/см^2, отношение удерживающего напряжения к сдвигающему составляет 10^{-4}, следовательно, размыва быть не может. Тем не менее, абразия имеет место, и ее предельная скорость может достигать по данным [Шуйский, Симеонова, 1976] до 0,01 м/год. Объяснение этому следующее: переувлажненный известняк под механическим и химическим воздействием потока воды в верхнем слое резко теряет прочностные свойства. Поверхностный слой толщиной в несколько миллиметров имеет удельное сцепление всего 0,5-1,2 кг/см^2. В этом случае, при скоростях потока на отдельных участках в 2,2 м/с и более будет происходить разрушение этого слоя. Подобные скорости наблюдались на порогах в период паводков и половодья.

В общем случае, скорость размыва будет пропорциональна руслообразующему расходу и отношению сдвигающего напряжения к удерживающему (чем это отношение больше, тем больше размыв):

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot Q\frac{\tau_{сдв}}{\tau_{уд}}, \qquad (2)$$

где h – размываемый слой, м;

k – коэффициент пропорциональности.

Предполагая, что при высоких берегах выход воды на пойму отсутствует и зависимость между уровнем и расходом квазилинейная, уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{BHL}{t}\frac{\tau_{сдв}}{\tau_{уд}} \quad \text{или} \quad \frac{dh}{dt} = k_1 \cdot \frac{H}{t}\frac{\tau_{сдв}}{\tau_{уд}}, \qquad (3)$$

где B – средняя ширина русла, м;

H – уровень воды при расходе Q, м;

L – длина порога, м;

t – время прохождения мгновенного руслоформирующего расхода воды через порог, с;

$k_1=kBL$.

Введем переменную C, обозначающую количество прохождений порогов руслоформирующим расходом за год:

$$C = \frac{T}{t},$$

где T – количество секунд в году.

В результате получим:

$$h_{год} = k_1 H \ln(C) \frac{\tau_{сдв}}{\tau_{уд}}.$$

На основании такого качественного подхода можно провести ориентировочную реконструкцию изменения отметок порогов в зависимости от увлажненности климата в предыдущие столетия. Увеличение увлажнения за исторический период ведет к подъему уровня в озере Ильмень, увеличению расхода воды в реке Волхов и ускорению размыва. Оценка той или иной степени увлажнения климата за столетний/тысячелетний период достаточно условна и принималась нами как отношение количества дождливых годов к годам с засухами на основании летописных данных [Борисенков, Пасецкий, 1988].

При расчетах значения уклонов водной поверхности приняты данным 1886 и 1927 гг.[8], коэффициента шероховатости по данным 1927 г.[9], длины участка Меньшаковской гряды по данным 1975 г.[10]

---

[8] *Карта озера Ильменя*, истока р. Волхова с устьем р. Мсты, устья р. Ловати с р. Полистью и устья р. Шелони, исследованных Ильменскою и Молого-Мстинскою описными партиями Министерства Путей Сообщения СПб: тип. Ильина, 1886. 59 л.
Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
[9] *Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства* / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
[10] *Лоция реки Волхов*. Ленинград, 1975. 102 с.

Расчетные значения коэффициента Шези, скорости течения проверены по отчету 1927 г.[11]

Расчетные минимальная и максимальная отметки уровня озера даны на начало периода на основании экстраполяции данных из отчета 1927 г.[12]

Для оценки скоростей размыва Пчевских и Велецких порогов необходимо иметь в виду следующие геологические и геоморфологические особенности.

1. 200-метровый слой силурийских и девонских известняков подстилает 300-метровый слой глин с песчаниками Валдайской серии верхнего протерозоя и балтийская серия нижнего отдела кембрийской системы [Геология СССР, 1971]. Величина изостатического поднятия [Виноградов, Обязов, 2018] для подобного слоя за счет сил упругой деформации могло составить 3-5 м.

2. Максимальные отметки верхней поверхности известняков на линии выхода глинта в районе Пчевских порогов (начальная отметка размыва) – 30 метров. При этом, мы имеем две старицы Волхова у Пчевских порогов: река Оломна – река Лезной – река Точной с отметками старого дна реки по линии Меньшаковской гряды в 18-20 м, а также река Велия – река Витка – река Росох – река Черная – ручей без названия между п.п. Чертково и Леготково – бол. Чистый мох – река Прусыня с отметками 20-22 м БС. Кроме того, старицу у Велецких порогов: Братовище – река Жубка – река Малый – разъезд 12 километр с отметками 18-20 м БС.

3. Средняя скорость размыва известняков выше расчетной за счет множественных прослоек глины и глинистых сланцев[13].

Повышение отметок воды в Ильмене за счет строительства плотины не привело к принципиальному изменению уровенного режима озера (таблица 2). Отметки Пчевских порогов достигали высоты гребня плотины Волховской ГЭС в III-V веке н.э. Следовательно, начиная со второй половины первого тысячелетия до наших дней, уровенный режим озера определялся только климатическими особенностями.

---

[11] *Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства* / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
[12] Там же
[13] Там же

Таблица 2. Расчетные отметки порога Меньшаковской гряды Пчевских порогов и уровней озера Ильмень

Table 2. Estimated marks of threshold the Menshakovsky ridge of the Pchevsky rapids and the water levels of Lake Ilmen

№ п/п	Глубины и отметки	Лет до нашей эры								Века нашей эры																			
		8000	7000	6000	5000	4000	3000	2000	1000	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
1	Условная глубина воды в верхнем бьефе порога, м	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,2	1,0	0,5	1,0	2,0	2,0	0,3	0,3	2,5	0,2	0,2	1,3	1,0	0,5	0,9	1,3	1,2	1,4	2,1	1,2	2,7	2,3	2,0
2	Отметка порога Меньша-ковская гряда, м БС	35,60	29,88	27,01	24,99	22,97	20,95	19,41	18,17	17,61	17,49	17,20	16,91	16,88	16,85	16,10	16,08	16,06	15,89	15,77	15,71	15,62	15,45	15,30	15,11	14,81	14,66	14,25	13,91
3	Максимальная отметка уровня оз. Ильмень, м БС	44,89	39,17	36,3	34,28	32,26	30,24	28,7	27,46	26,9	26,78	26,49	26,2	26,17	26,14	25,39	25,37	25,35	25,18	25,06	25,00	24,91	24,74	24,59	24,4	24,1	23,95	23,54	23,2
4	Минимальная отметка уровня оз. Ильмень, м БС	37,5	31,78	28,91	26,89	24,87	22,85	21,31	20,07	19,51	19,39	19,1	18,81	18,78	18,75	18	17,98	17,96	17,79	17,67	17,61	17,52	17,35	17,2	17,01	16,71	16,56	16,15	15,81

К началу нашей эры уровень порогов был выше на 1 м гребня плотины, что ограничивало минимальный уровень озера на отметках не ниже 19,5 м. Максимальный уровень, учитывая схожесть климата с последними столетиями [Борисенков, Пасецкий, 1988], скорее всего, не превышал отметки в 24,5 м, то есть амплитуда уровней была меньше современной.

В более ранний период уровень озера предположительно менялся более резко. Это связано с увлажнением климата 6-4 тыс. л.н. и значительным уровнем гребня порогов. Кроме того, дискретное изменение уровня озера происходило не только за счет изменения влажности климата, но и по причине особенностей строения силурийских известняков (плитчатая структура)[14].

Попытаемся провести анализ уровенного режима озера по фактическому материалу, имея в виду, что Волховская ГЭС начала свою работу в 1926 г.

Объективные данные по уровням

Максимальные и минимальные измеренные уровни за весь период наблюдений [Многолетние данные …, 1986] по уровенным постам, действовавшим в различные годы на оз. Ильмень и на реках Волхов (г. Новгород), Ловать (пос. Взвад) и Полисть (г. Старая Русса) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Данные по экстремальным уровням на постах оз. Ильмень (в метрах над уровнем моря БС). Местоположение постов приведено на рисунке 4

Table 3. Data of extreme water levels on the observation network of Lake Ilmen (in meters above the sea level of the Baltic system). The location of the observation network is shown on Figure 4

№ п/п	Пост	Максимальный уровень (год)	Минимальный уровень (год)
1	оз. Ильмень-Песчаное	22,70 (1966)	16,17 (1940)
2	оз. Ильмень-Коростынь	22,73 (1966)	16,26 (1945)
3	оз. Ильмень-Ужин	22,79 (1966)	16,17 (1940)
4	оз. Ильмень-Войцы	22,72 (1966)	16,17 (1940)
5	река Волхов-Новгород	22,66 (1966)	15,71 (1940)
6	река Ловать-Взвад	22,93 (1922)	16,30 (1882)
7	река Полисть-Старая Русса	22,93 (1922)	16,79 (1882)

[14] Палицын Е.А. Озеро Ильмень и река Волхов в связи с проектом шлюзования и использования энергии падения воды. СПб.: Типография Министерства путей и сообщения т-ва И. Н. Кушнерев и К°, 1912. 370 с.

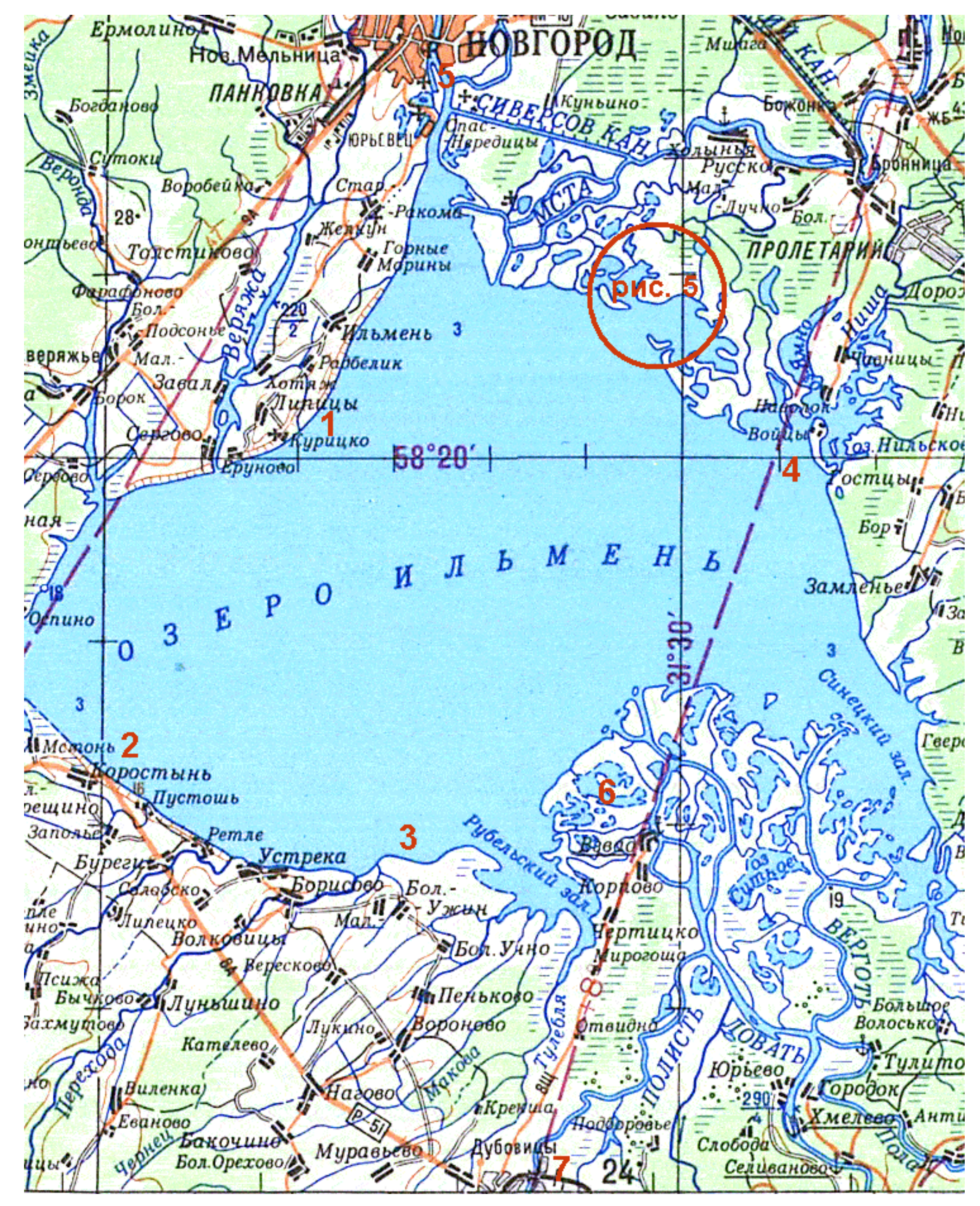


Рисунок 4. Озеро Ильмень и местоположение уровенных постов на нем (таблица 3)[15]

Figure 4. Lake Ilmen and the location of water level observation network on it (table 3)

По данным Молого-Мстинской описной партии (1886 г.) при составлении профиля реки Волхов уровень высоких вод реки Волхов-Новгород в 1885 г. составил 23,91 м, что на 3 м выше данных [Ресурсы поверхностных вод, 1972]. По этим данным максимальный уровень

[15] Топографическая карта: лист О-36-51: масштаб 1:100 000. Генеральный штаб, 1987

реки Волхов-Новгород составил 22,91 в 1922 г., что соответствует данным постов Взвад и Старая Русса за тот же год (таблица 3).

По данным отчета 1927 г.[16] минимальный уровень на посту Волхов-Новгород составил 15,68 м (1882 и 1921 гг.), а в озере за период наблюдений 1881-1926 гг. – 15,81 м, что противоречит данным, представленным в 1912 г.[17], – 16,79 (1882, 1901, 1908). Максимальный уровень пост Волхов-Новгород – 23,09 (1922 г.) или 23,2 м (1899, 1922) для створа Спас-Пископец[18].

Картографические данные

Согласно утвержденным Военно-топографическим управлением Генерального штаба условным знакам[19] отметки урезов соответствуют линии уреза воды в межень озер и линии НПУ водохранилищ.

Оценка уровней на исторических картах может быть произведена привязкой только к определенным фиксированным объектам – церквям, характерным точкам рельефа или гидрографической сети и их отношению к урезу озера при известной отметке. Однако даже при работе с картографическим материалом последнего столетия мы сталкиваемся с известными трудностями. В качестве иллюстрации приводим вырезки одной и той же местности из карт 1937 и 1987 гг. изданий (рисунок 5). Нет сомнений, что уровень озера на второй карте выше. Полуостров между озерами Песчаное и Колодежское стал островом, обводненная площадь резко выросла. Однако, отметки уреза в первом случае 19,0 м, а во втором – 18,1 м! В случае с картой 1987 г. издания верить декларированному урезу не стоит. Урез воды при такой линии берегов озера близок к отметке 19,6 м. Поэтому при реконструкции уровней озера на старых картах, мы пользовались либо данными карт 1928-1937 гг., либо данными космоснимков на дату с известным уровнем озера.

[16] *Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства* / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
[17] Палицын Е.А. Озеро Ильмень и река Волхов в связи с проектом шлюзования и использования энергии падения воды. СПб.: Типография Министерства путей и сообщения т-ва И. Н. Кушнерев и К°, 1912. 370 с.
[18] Палицын Е.А. Озеро Ильмень и река Волхов в связи с проектом шлюзования и использования энергии падения воды. СПб.: Типография Министерства путей и сообщения т-ва И. Н. Кушнерев и К°, 1912. 370 с.
Общий технический отчет Отдела Изысканий Волховского Строительства / Под ред. В.М. Родевича. Л.: Издание Строительства Государственной Волховской Гидроэлектрической Силовой Установки, 1927. 440 с.
[19] Условные знаки для топографических карт масштабов 1:25000, 1:50000, 1:100000. М.: Военно-топографическое управление Генерального штаба, 1983. 118 с.

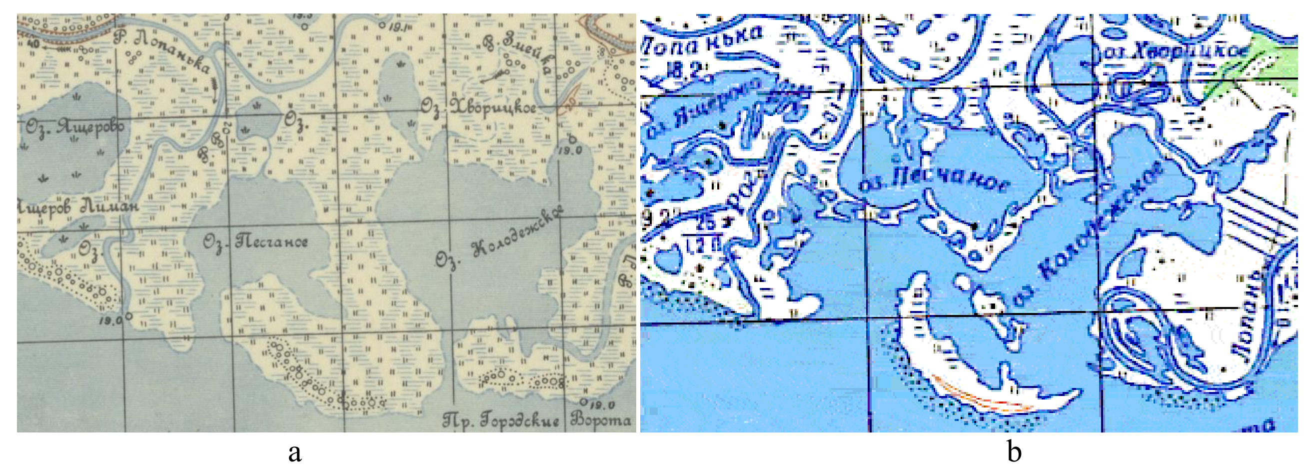


Рисунок 5. Северо-западная часть озера Ильмень на картах 1940[20] (a) и 1987[21] (b) гг.

Figure 5. The northwestern part of Lake Ilmen on maps of 1937(a) and 1987 (b)

<u>Уровни после создания Волховской ГЭС:</u>

Карта управления военных топографов 1932 г. – 17,5 м.

Карта ГУ Государственной съемки и картографии НКВД СССР 1937 г. – урез озера 19,0 м.

Карта Генштаба РККА 1938 г. – 17,2 м. (НПУ 15,74м).

Карты Генштаба СССР 1985-1991 г. (состояние местности 1966-1983, 1982-1988 гг.) – 18,1 м. (НПУ 17,25м)

<u>До создания Волховской ГЭС:</u>

Карта военно-топографического управления 1928 г. издания – урез озера 17,0 м.

Карта 1886/1888 гг., составленная по исследованиям Ильменской и Молого-Мстинской описных партий под руководством гг. с. Жвана и Э. Вилькена, – 17,06 м.

Отметки урезов воды более ранних карт оценены по косвенным данным.

Карта 1870 г., составленная по результатам топографической съемки 1860-62 гг. и гидрографической съемки 1819 и 1823 гг. – 18,7 м.

Карта 1732 г. (рисунок 6) – 16,0 м.

Единственная карта, на которой реки Тулебля и Черная (Чернец) впадают в реку Ловать, представлена на рисунке 6. На всех остальных картах обе реки впадают в Тулебельский залив. Однако, анализ космоснимков, особенно сделанных при низком уровне воды в озере (рисунок 7), подтверждает тот факт, что рекаТулебля некогда впадала в реку Ловать. В настоящее время нижнее течение реки Тулебя осталось в виде протоки Подборовка.

---

[20] Карта РККА: лист О-36-51-Г: масштаб 1:50 000, 1940.

[21] Топографическая карта: лист О-36-001: масштаб 1:500 000. Генеральный штаб, 1988

Река Чернец возможно имела продолжение в виде протоки Копанец. Отметки дна старого русла реки Чернец в Тулебльском заливе (по данным промеров 1819, 1823 гг.) – 16,0-16,2 м БС. Старые (затопленные) берега – 16,4-16,6 м. Отметки дна реки Тулебля – 16,2-16,4, берега – 16,6-16,7 м.



Рисунок 6. Карта лесов и сплавных рек Старорусского уезда Новгородской губернии 1732 г.[22]

Figure 6. Map of forests and rafting rivers of the Starorussky district of Novgorod province in 1732

[22] Карта Старорусского уезда 1732 года [Электронный ресурс] // ЭтоМесто. URL: http://www.etomesto.ru/karta4038/ (дата обращения: 01.12.2019)



Рисунок 7. Тулебельский залив осенью 2016 г. при уровнях около 16,8 м.
Источник: http://search.kosmosnimki.ru/?link=P9DRJ
Figure 7. Tulebelsky Bay in autumn 2016 at water levels about 16.8 m

На карте 1886/1888 г. (рисунок 8) при обозначенных отметках 17,06 м Тулебельский залив в ширину не превышает 250 м. Русло Тулебли уже идет мимо Подборовки в озеро (рисунок 8). В месте впадения реки Чернец, на снимке 2016 г. при отметках около 16,8, ширина залива в этом месте – более 2,5 км. Почему же при близких отметках озеро так далеко отступило в конце 19 века? Данное противоречие разъясняется просто – береговую линию отбивали при создании топографической основы в 1886 г. – когда меженный летний уровень воды был близок к отметке 16,0 м [Ресурсы поверхностных вод, 1972]. Промеры же глубин с привязкой к урезу 17,06 м проводили в последующие годы.



Рисунок 8. оз. Ильмень, Тулебельский залив, на карте 1886 г.[23]

Figure 8. Tulebel Bay Lake Ilmen on the map of 1886

На основании этих соображений можно предположить, что уровень озера на период съемки карты 1732 г. составлял около 16,0 м.

Карта 1724 г. – уровень 19,9-20,1 м.

Карта Шуберта (1860-е гг.) – 16,9 м.

Карта 1790 г. – 17,9 м.

Карта генеральный геометрический план 1788 г. – 18,0 м.

Карта 1611 г. – 15,8-16,0 м.

Результаты уровней озера Ильмень сведены в таблицу 4, строка 2. Реконструкция уровней дана с учетом размыва Пчевских порогов и изостатического поднятия котловины озера [Виноградов, Обязов, 2018].

Общий вывод: средний уровень за 17-18 вв. – 17,5 м.

[23] *Карта озера Ильменя*, истока р. Волхова с устьем р. Мсты, устья р. Ловати с р. Полистью и устья р. Шелони, исследованных Ильменскою и Молого-Мстинскою описными партиями Министерства Путей Сообщения СПб: тип. Ильина, 1886. 59 л.

Таблица 4. Отметки уровней озера Ильмень с учетом изостатического поднятия и изменения отметок Пчевских порогов, м БС

Table 4. Marks of the water levels of Lake Ilmen, taking into account the isostatic rise and changes in the marks of the Pchevsky rapids, m of the Baltic system

годы	1611	1724	1732	1788	1790	1823	1860	1860/62	1882	1886	1887	1921	1922	1940	1966	2016
отметка	17,2	20,0	16,7	18,0	17,4	18,7	16,9	16,5	15,8	16,0	17,1	15,9	23,2	16,2	22,7	16,8
с учетом изостатического поднятия	16,8	19,8	16,5	17,9	17,3	18,6	16,8	16,4	15,8	16,0	17,1	15,9	23,2	16,2	22,7	16,8

Геологические и топографические данные об уровенном режиме

Наша временная оценка отступления края Осташковского ледника от истоков реки Ловать 17-15 тыс. л.н. [Hughes et al, 2016; Gorlach, Hang, Kalm, 2017; Rinterkneht et al., 2018; Subetto et.al, 2018; Виноградов, Обязов, Кадацкая, 2019] подтверждается данными [Малаховский, 2001], который вычленил выше г. Великие Луки на реке Ловать не выраженную в рельефе послеледниковую террасу, возраст которой составляет 14-13 тыс. лет, современные отметки около 110 м (**85** м – далее полужирным в скобках – отметки БС на соответствующий период). У д. Малахово 2 террасы высотой 6 и 12 м от отметки меженного уреза 103,1 м (1927) или 109 и 115 м соответственно (около **85** м) [Малаховский, 2001]. У д. Леонова озерно-ледниковые отложения мощностью 3-7 м распространены повсеместно на отметках около 80-85 метров (около **60** м БС). Следовательно, 14 тыс. лет назад река Ловать впадала в Праильмень несколько выше устья реки Вица (д. Дунаево), т.е. истоки рек Полисть, Шелонь, Порусья были еще затоплены [Субетто, 2007].

После деградации Валдайского ледника, уровень Средне-Ловацого (Привалдайского) приледникового озера [Квасов, 1975] снизился с отметок от 85 [Квасов, 1975; Васильева и др., 2012] м абс. (**60** м) (около 12,5 тыс. л.н.) до отметок в 60 м (около **40** м), где на достаточно длительный период стабилизировался [Субетто, 2007; Gorlach, Hang, Kalm, 2017].

Почти по всей долине реки Ловати, Д.Б. Малаховский и Е.Н. Былинский (у последнего рассматриваемая терраса – IV) [Былинский, 1959; Малаховский, 2001] прослеживают террасу с отметками: на участках устье Насвы-Дунаево – 68 м, Дунаево-Холм – 67 м, Холм-Черенчицы

– 58 м (±2 м). С учетом нашей реконструкции, разница в поднятии участков Дунаево-Холм и Холм-Черенчицы составляет 9 м, что позволяет предположить, что речь идет об одном и том же уровне. Абразионные следы по всей южной оконечности оз. Ильмень на отметках 60 м (разница в поднятии с участком Холм-Черенчицы составляет 2 м!) говорят о том, то данная терраса соответствует уровню оз. Ильмень после отступания ледника (на тот период – **40** м БС).

Отметки ледникового озера достаточно длительный период последовательно располагались на уровнях с современными отметками 60 и 40 м, что прослеживается по выраженным абразионным уступам в южной и юго-восточной частях низменности[24]. Однако, вскоре после отступления ледника, современная отметка в 60 м была на 21 м ниже, т.е. на тот период уровень озера не превышал **40** м БС. Озерно-ледниковые отложения верхнего звена Валдайского надгоризонта имеют место до отметок 35-40 м на юго-востоке и 30 м на юго-западе низменности. Западнее эти отложения погребены под слоем более поздних отложений. Ледниковые отложения представлены глинами и тяжелыми валунными трудно размываемыми суглинками, покрывающими 20-метровым слоем всю Приильменскую низменность. По реке Ловать эти отложения начинают прослеживаться от устья реки Близнея от высот 65 м (**42** м). У д. Борок на Ловати развиты первая и вторая надпойменные террасы, имеющие соответственно высоты 76 и 80 м (около **60** м).

Выше д. Сопки выделяются еще две цокольные террасы, относительной высотой 13-16 и 24-26 м. Абсолютные отметки террас – около 60 и 72 м (**42** и **55** м). В [Былинский, 1959] выделяется четвертую террасу от пос. Малых Куниц до пос. Бабынино. Ее отметка на всем протяжении составляет около 72 м (**55** м). У пос. Рахлиц верхняя цокольная терраса [Малаховский, 2001] достигает высоты 55 м (около **38** м), а по [Былинский, 1959], ее высота не превышает 47 м (**31-32** м). В районе д. Рамушево выклинивается первая надпойменная терраса, ее разрез был изучен [Малаховский, 2001] у д. Черенчица, где она имеет высоту около 25-27 м (**20-22** м, 4-5 тыс. л.н.). Этот уровень поддерживался в озере достаточно длительный период, как уже указывалось выше, отметки абразионных уступов (около 40 м) соответствуют уровню озера в 22-24 м 9-10 тыс. л.н. В описании реки отметка 25,5 м (те же **20-22** м, 4-5 тыс. л.н.).

[24] Карта четвертичных отложений: O-36-XX (Старая Руса). Ильменская серия, масштаб: 1:200000, серия: Ильменская / редактор: К.Э. Якобсон. Северо-Западное производственное геологическое объединение, 1988.

Особую трудность (в силу наличия дополнительной информации) вызывает реконструкция уровней озера Ильмень последние столетия. Базис эрозии для всех рек, впадающих в озеро — это его средний уровень. Следовательно, его уровень – это отметка, ниже которой впадающие в озеро реки не могут углубить своё русло. Однако, отметки дна рек, впадающих в оз. Ильмень ниже не только среднего уровня, но и отметок дна озера. Причем минимальная отметка дна озера – 13,3 м, а минимальные отметки дна рек, впадающих в Ильмень следующие: реки Ловати (таблица 5) – 8,2 м (до конца устьевого участка реки по картам 1886 года 4 км[25]), реки Мсты – 8,2 (6 км), реки Шелони – 12,0 (7 км). На основании этого можно сделать предварительный вывод, что уровень озера Ильмень в прошлом был ниже, нежели в настоящее время и составлял современные 16-17 м БС. Анализ климатической ситуации в 14-18 веках говорит о сплошной череде холодных зим и летних засух. Этот факт подтверждается ростом приустьевого бара за последние 200 лет на 1,3 метра (при средних глубинах 2-2,5 м).

Таблица 5. Минимальные отметки дна реки Ловать по данным различных гидрографических съемок, м БС

Table 5. The minimum bottom marks of the river Lovat' according to various hydrographic surveys, m of Baltic system

годы	отметка уреза озера	отметка дна в месте бифуркации Старой и Новой Ловати	отметка дна в месте слияния Старой и Новой Ловати	отметка дна приустьевого бара
1823	18,70	12,10	8,20	15,65
1886	17,07	10,51	7,25	16,01
1887	17,07	10,43	7,08	16,62
1990	18,00			16,80

Отметки уровня озера на 1823 г. рассчитывались на основании морских описей 1819-1823 гг., путем обратного пересчета из средних глубин озера на 1886 г. по десяти створам. Точность пересчета $\pm 0{,}05$ м.

Река Мста. После соединения с рекой Волхов Сиверсовым каналом глубины составили 4-4,5 м, максимальная – 8,9 м. После бифуркации с рекой Большой Гнилкой –

[25] *Карта озера Ильменя*, истока р. Волхова с устьем р. Мсты, устья р. Ловати с р. Полистью и устья р. Шелони, исследованных Ильменскою и Молого-Мстинскою описными партиями Министерства Путей Сообщения СПб: тип. Ильина, 1886. 59 л.

глубины реки Мсты 1,5-2 м, реки Б. Гнилки – 1-1,5 м. На 1820 г. отметки бара – 16,75 м, на 1886 – 16,4 м, на 1990 – 17,0 м.

Река Шелонь. На 1886 г. перед устьевой бифуркацией, глубины составляли 5 м, а основного (правого) рукава – 2-2,5 м. На 1820 г. глубины правого рукава достигли 3-3,5 м. На 1820 г. отметки бара – 15,9 м, на 1886 – 16,5 м, на 1990 – 17,0 м.

Река Волхов. Данные об отметках дна приведены в таблице 6. Отметка Ладожского (Петропавловского) порога – 13,44 м. Отметка УВВ (уровня высоких вод) (половодье 1885 г.) на пороге – 17,30. Средние глубины реки в пределах города – около 4 м.

Таблица 6. Минимальные отметки дна реки Волхов по данным различных гидрографических съемок, м БС

Table 6. The minimum bottom marks of the river Volkhov according to various hydrographic surveys, m of Baltic system

Волхов	отметка озера	отметка в створе Троица	отметка в створе Мал. Волховец	отметка в створе церкви Бориса и Глеба	отметка в створе монастыря Антония Римлянина
1823	18,70	15,45	13,35	14,55	14,55
1862	18,60	-	14,70	14,70	14,40
1887	17,07	15,53	14,17	12,80	13,44
1975	18,75	16,05	15,45	14,35	14,55

Подъем отметок порога при входе в Волхов за 150 лет на 0,6 м подтверждает тот факт, что ранее уровень озера Ильмень был ниже. Наконец, главный тезис в пользу повышения уровня озера в последние столетия. В морских описях 1819-1823 гг. просматриваются русловые врезы рек Шелонь и Ловать, т.е. баром они еще не полностью перекрыты.

Выводы

Средний уровень озера Ильмень последние столетия (17-19 вв.) был несколько меньшим подпорного современного, несмотря на превышение отметок Волховских порогов над современным уровнем на 0,5-1,0 м.

Отметки Пчевских и Велецких порогов в последние 10 тыс. лет опустились за счет размыва ориентировочно на 21 м.

Последние 5 тыс. лет средний уровень оз. Ильмень достаточно стабилен и колеблется в пределах 20-24 м БС.

Литература

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы: учебное пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 454 с.

Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.

Былинский Е.Н. Влияние снижения уровней Ильменского и Ладожского озера на развитие продольных профилей притоков оз. Ильмень и Волхова // Вестн. Моск. ун-та: Сер. биологии, почвоведения, геологии, географии. 1959. № 3. С. 221-231

Васильева Н.В., Субетто Д.А., Вербицкий В.Р., Кротова-Путинцева А.Е. История формирования Ильмень-Волховского бассейна // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2012. С. 141-150.

Виноградов А.Ю., Обязов В.А. Гляциоизостатическое поднятие Приильменской низменности в голоцене // Сборник научных трудов XXIV

References

Baryshnikov N.B., Popov I.V. *Dinamika ruslovykh potokov i ruslovye protsessy: uchebnoe posobie [Dynamics of streams and fluviomorphological processes in rivers: text-book]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1988. 454 p. (In Russian; abstract in English).

Borisenkov E.P., Pasetskii V.M. *Tysyacheletnyaya letopis' neobychainykh yavlenii prirody [The thousand-year chronicle of extraordinary natural phenomena].* Moscow, Publ. Mysl', 1988. 522 p. (In Russian).

Bylinskii E.N. Vliyanie snizheniya urovnei Il'menskogo i Ladozhskogo ozera na razvitie prodol'nykh profilei pritokov oz. Il'men' i Volkhova [The impact of lower levels of Lake Ilmensky and Ladoga on the development of longitudinal profiles of tributaries of Lake Ilmen and Volkhova]. *Vestnik Moskovskogo universiteta: Seriya biologii, pochvovedeniya, geologii, geografii [Moscow University Bulletin: Series of Biology, Soil Science, Geology, Geography]*. 1959, No. 3, pp. 221-231. (In Russian).

Chuvardinskii V.G. *O lednikovoi teorii. Proiskhozhdenie obrazovanii lednikovoi formatsii [About glacial theory. The origin of the formations of the glacial formation].* Apatity, 1998. 303 p. (In Russian).

Geologiya SSSR. V 48 tomakh. Tom 1. Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti. Geologicheskoe opisanie. Severo-Zapadnoe territorial'noe [*Geology of the USSR*. In 48 volumes. Volume 1. Leningrad, Pskov and

Международной научно-практической конференции «Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия» (Москва, 01-02 апреля 2018 г.). М.: Проблемы науки, 2018. С. 99-102.

Виноградов А.Ю., Обязов В.А., Кадацкая М.М. История формирования рек Южного Приильменья в голоцене // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 90-113.
DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.001

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 143 с.

Геология СССР. В 48 томах. Том I. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание. Северо-Западное территориальное / Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1971. 504 с.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 428 с.

Зубов В.Г. Механика. М.: Наука, 1978. 352 с.

Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 279 с.

Novgorod regions. Geological description. Northwest Territorial] / A.V. Sidorenko (ed.). Moscow, Publ. Nedra, 1971. 504 p. (In Russian).

Gorlach A., Hang T., Kalm V. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas*, 2017, vol.46, iss.3, pp. 486-502. DOI: 10.1111/bor.12223.

Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*.Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 428 p. (In Russian).

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas*, 2016, vol. 45, iss.1, pp. 1-45. DOI: 10.1111/bor.12142.

Kvasov D.D. *Pozdnechetvertichnaya istoriya krupnykh ozer i vnutrennikh morei Vostochnoi Evropy [Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe]*. Leningrad, Publ. Nauka, 1975. 279 p. (In Russian).

Malakhovskii D.B. Geomorfologicheskie i geologicheskie nablyudeniya v doline r. Lovat' [Geomorphological and geological observations in the valley of the Lovat river]. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo obshchestva [Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshestva]*, 2001, vol. 133, iss. 2, pp. 32-38. (In Russian).

Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi: v 15 t. T. 1. RSFSR: v 26 vyp. Vyp. 5. Basseiny rek Baltiiskogo morya, Ladozhskogo i Onezhskogo ozer [Long-term data on the regime and resources of land surface water: in 15 volumes. Volume 1. RSFSR:

Малаховский Д.Б. Геоморфологические и геологические наблюдения в долине реки Ловать // Известия Русского Географического общества. 2001. Т. 133. Вып. 2. С. 32-38

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: в 15 т. Т. 1. РСФСР: в 26 вып. Вып. 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 689 с.

Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учебное пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. 392 с. DOI: 10.12737/11719

Петров А.Г., Потапов И.И. Перенос наносов под действием нормальных и касательных придонных напряжений с учетом уклона дна // Прикладная механика и техническая физика. 2014. т. 55. № 5 (327). С. 100-105.

Ресурсы поверхностных вод: в 20 т. Т. 2. Карелия и Северо-Запад: в 2 ч. Ч. 2. Приложения / Под ред. В.Е. Водогрецкого. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 278 с.

Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем // Общество. Среда. Развитие (Terra

in 26 issue. Issue 5. River basins of the Baltic Sea, Ladoga and Onega Lakes]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1986. 689 p. (In Russian).

Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot: uchebnoe posobie [Destruction of rocks during exploration: a training manual].* Moscow, Publ. SPC INFRA-M, 2016, 392 p. (In Russian). DOI: 10.12737/11719

Petrov A.G., Potapov I.I. Sediment transport under normal and tangential bottom stresses with the bottom slope taken into account. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics,* 2014, vol. 55, iss. 5, pp. 812-817. DOI: 10.1134/S0021894414050101

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 vol. Vol.2: Kareliya i Severo-Zapad: v 2 ch. Chast' 2. Prilozheniya. [Surface water resources of the USSR: in 20 vol. Vol. 2: Karelia and North-West: in Two parts. Part 2. Applications]. Ed. Vodogretskiy V.E. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 278 p. (In Russian).

Rinterknecht V., Hang T., Gorlach A., Kohv M., Kalla K., Kalm V., Subetto D., Bourlès D., Léanni L., Guillou V. The Last Glacial Maximum extent of the Scandinavian Ice Sheet in the Valday Heights, western Russia: Evidence from cosmogenic surface exposure dating using ^{10}Be. *Quaternary Science Reviews*, 2018, vol. 200, pp. 106-113. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.09.032

Shashenko O.M., Pustovoitenko V.P., Sdvizhkova O.O. *Geomekhanika: uchebnik [Geomechanics: textbook].* Kiev, Publ. State Higher Educational Institution National Mining University, 2015. 563 p. (In Russian).

Humana). 2007, № 1 (2). С. 111-120.

Чувардинский В.Г. О ледниковой теории. Происхождение образований ледниковой формации. Апатиты, 1998. 303 с.

Шашенко О.М., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова О.О. Геомеханика: учебник. К.: ГВУЗ Национальный горный университет, 2015. 563 с.

Шуйский Ю.Д., Симеонова Г. О влиянии геологического строения морских берегов на процессы абразии // Докл. Болг. АН. 1976. Т. 29. №2. С. 57-79.

Gorlach A., Hang T., Kalm V. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus // Boreas. 2017. Vol. 46. Iss. 3. P. 486-502. DOI: 10.1111/bor.12223.

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1 // Boreas. 2016. Vol. 45. Iss. 1. P. 1-45. DOI: 10.1111/bor.12142.

Rinterknecht V., Hang T., Gorlach A., Kohv M., Kalla K., Kalm V., Subetto D., Bourlès D., Léanni L., Guillou V. The Last Glacial Maximum

Shuiskii Yu.D., Simeonova G.A. O vliyanii geologicheskogo stroeniya morskikh beregov na protsessy abrazii [On the influence of the geological structure of sea coasts on the processes of abrasion]. *Doklady Bolgarskoi Akademii Nauk* [*Reports of the Bulgarian Academy of Sciences*], 1976, vol. 29, no 2, pp. 57-79. (In Russian)

Subetto D.A. Istoriya formirovaniya Ladozhskogo ozera i ego soedineniya s Baltiiskim morem [The history of the formation of Lake Ladoga and its connection with the Baltic Sea]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)* [*Society. Environment. Development (Terra Numana)*], 2007, no 1 (2), pp. 111-120. (In Russian).

Subetto D.A., Shvarev S.V., Nikonov A.A., Zaretskaya N.E., Poleshchuk A.V., Potakhin M.S. New evidence of the Vuoksi River origin by geodynamic cataclysm. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2018, vol. 90, pp 275-289. DOI: 10.17741/bgsf/90.2.010.

Vasilieva N.V., Subetto D.A., Verbitsky V.R., Krotova-Putintseva A.E. Istoriya formirovaniya Il'men'-Volkhovskogo basseina [History of the Ilmen-Volkhov Basin Development]. *Izvestiya Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni A.I. Gertsena* [*Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*], 2012, no. 153(2), pp. 141-150. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A. Glyatsioizostaticheskoe podnyatie Priil'menskoi nizmennosti v golotsene [Glacio-isostatic uplift of the Priilmen lowland in the Holocene]. *Sbornik nauchnykh trudov chetyrnadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye issledovaniya: klyuchevye problemy tret'ego*

extent of the Scandinavian Ice Sheet in the Valday Heights, western Russia: Evidence from cosmogenic surface exposure dating using ^{10}Be // Quaternary Science Reviews. 2018. Vol. 200. P. 106-113. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.09.032

Subetto D.A., Shvarev S.V., Nikonov A.A., Zaretskaya N.E., Poleshchuk A.V., Potakhin M.S. New evidence of the Vuoksi River origin by geodynamic cataclysm // Bulletin of the Geological Society of Finland. 2018. Vol. 90. P. 275-289.
DOI: 10.17741/bgsf/90.2.010.

tysyacheletiya» (Moskva, 01-02 aprelya 2018) [*Collection of scientific papers of the fourteenth International scientific-practical conference "Scientific research: key problems of the third millennium" (Moscow, April 01-02, 2018)*], Moscow, Problems of science Publ., 2018, pp. 99-102. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Kadatskaya M.M. Istoriya formirovaniya rek Yuzhnogo Priil'men'ya v golotsene [History of formation of the rivers of south Prilimenium in holotsen]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 90-113 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.001

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (In Russian).

Zubov V.G. *Mekhanika [Mechanics]*. Moscow, Publ. Nauka, 1978. 352 p. (In Russian).

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE OF THE EARTH

УДК 556.047
DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.003

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ СУХОНЫ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

А.В. Белый

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

bely.epir@yandex.ru

Аннотация. Обратное течение реки Сухоны в районе её истока из озера Кубенское отмечается практически ежегодно. Формирование этого явления связано с особенностями ландшафта, морфологией русла и временной динамикой хода весеннего половодья реки Сухоны и её притоков. Целью исследования явилось выявление и оценка основных гидрологических и гидрохимических характеристик этого уникального явления.

Необходимость исследования обусловлена тем, что река Сухона в период обратного течения транспортирует в озеро Кубенское загрязнённые стоки крупных предприятий и городов. Для этого были решены следующие задачи:

HYDROECOLOGICAL FEATURES OF THE REVERSE FLOW ON THE SUCHONA RIVER DURING THE SPRING FLUID

Anatoly V. Bely

Vologda State University, Vologda, Russia

bely.epir@yandex.ru

Abstract. The annually reverse course of the Sukhona River, Northern Russia, is due to the features of the landscape, to the channel morphology, and to the time dynamics of spring flood of Sukhona and its tributaries. The evaluation of main hydrological and hydrochemical characteristics of this unique phenomenon is important practically because during the reverse flow the river transports the wastewater from enterprises and cities to its source from Lake Kubenskoye.

A number of results have been got:

— the hydrological regime of Sukhona and of its upper tributaries obtained from

— собрана и проанализирована информация по гидрологическому, уровенному и гидрохимическому режиму реки Сухоны и её верхних притоков – рек Вологды и Лежи;

— выявлены основные факторы обратного течения в верховьях реки Сухоны в период весеннего половодья и выполнены гидрологические расчёты;

— дана статистическая оценка показателей жидкого и твёрдого стока во время противотечения;

— выполнен гидродинамический расчёт дальности проникновения загрязнённых вод обратного стока в озеро Кубенское;

— дана оценка гидрохимических показателей качества вод Верхней Сухоны и южной акватории озера Кубенское в период обратного течения;

— оценены возможные изменения качества вод озера Кубенское и риски, связанные с рассматриваемым явлением.

Решению этих задач способствовало получение гидрологической информации на водомерных постах на Верхней Сухоне, что позволило выполнить расчёты гидрологических характеристик обратного стока. Методами математической статистики выполнено приведение рядов наблюдений к многолетнему периоду, что дало возможность получить следующие показатели обратного стока: продолжительности, расходов и объёмов воды, скоростей течения, объёмов русловых наносов заданной повторяемости.

every provided issues;

— the main factors of the reverse flow have been revealed and the hydrological computations have been carried out;

— the statistical evaluation for the main indexes of solid and liquid flow during the reverse course has been provided;

— the hydrodynamic calculation for the distance of ingress of polluted waters into Lake Kubenskoye has been elaborated;

— the hydrochemical indexes of the water quality have been provided;

— the possible changes of water quality of Lake Kubenskoye and the risks of its pollution were considered.

The unique hydrological information from newly established water-measuring points enabled the valid estimation for the hydrological and hydraulic characteristics of the reverse course. The setting of observation sequences to the multi-year period have been made by statistical methodics and correlation analyze. The obtained empirical relationships can set up the prerequisites of a comprehensive forecast model for consequences of the reverse flow. The basic factors for pollution of waters of Sukhona have been revealed and the probability of pollution of Lake Kubenskoye, used for the water

Bely A.V. Hydroecological features of the reverse flow on the Suchona River during the spring fluid. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 219-244 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.003

Также оценена вероятность загрязнения озёрных вод, используемых для водоснабжения областного центра – города Вологды, сформулированы выводы и рекомендации по снижению риска негативных последствий обратного стока реки Сухоны в период весеннего половодья.

Ключевые слова: река Сухона; озеро Кубенское; сток; обратное течение; загрязнение; гидроэкосистема; гидрохимия; гидрологические характеристики

supplying of the regional center Vologda, was estimated too. Under that, the conclusions and recommendations for risk reducing of the negative hydro-ecological after-effects of the reverse flow have been formulated.

Keywords: Sukhona River; Lake Kubenskoye; river flow; reverse flow; pollution; hydroecological; hydrochemistry; hydrological characteristics

Введение

В период весеннего половодья река Сухона – примерно от истока до деревни Устье-Вологодское – на некоторое время меняет своё течение на противоположное. Это, в большей или меньшей степени, происходит практически ежегодно.

Весной, в начале подъёма уровней воды и в начале ледохода, течение реки Сухона вдруг останавливается, и река в течение суток поворачивает своё течение вспять, в озеро Кубенское. Обратный ход реки может продолжаться неделю, и больше. Удивительное зрелище, когда взмученные воды Сухоны, довольно грязные, начинают окрашивать белоснежный ледовый покров озера, а на входе в озеро начинают громоздиться серые льдины, вынесенные с промышленной зоны города Сокола.

Обратное течение реки Сухоны в озеро Кубенское можно было бы назвать интересным природным явлением, если бы не некоторые его негативные стороны.

Главным риском ухудшения качества водных ресурсов является то, что вместе с талыми водами в озеро Кубенское могут попадать загрязнённые воды с территорий и промышленных предприятий городов Вологды и Сокола.

В контексте рассматриваемой тематики следует отметить, что в силу дефицита водных ресурсов, необходимых для снабжения города Вологды, озеро Кубенское является главным источником питьевого и технического водоснабжения областного центра в маловодные, критические периоды года. Качество вод указанного водоёма должно быть не ниже уровня требований для объектов водоснабжения рыбохозяйственной категории.

В этой связи целью настоящего исследования является детальная количественная оценка и прогноз основных гидрологических, гидрохимических характеристик противотечения реки Сухоны во время весеннего половодья.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

— провести сбор и анализ информации по гидрологическому, уровенному и гидрохимическому режиму реки Сухоны и её верхних притоков – рек Вологды и Лежи во всех имеющихся источниках;

— выявить основные факторы обратного течения в верховьях реки Сухоны в период весеннего половодья и выполнить гидрологические расчёты;

— дать статистическую оценку основных показателей жидкого и твёрдого стока во время противотечения;

— выполнить гидродинамический расчёт дальности проникновения загрязнённых вод обратного стока в озеро Кубенское;

— дать оценку гидрохимических показателей качества вод Верхней Сухоны и южной акватории озера Кубенское в период обратного течения;

— оценить возможные изменения качества вод озера Кубенское и возможные риски в связи с рассматриваемым явлением.

Объект исследования

Особенностью озера Кубенского является широко известный факт возникновения обратного течения реки Сухоны во время весеннего половодья. Качественная оценка и описание процесса противотечения и его движущих факторов отмечается во многих работах[1] [Ильинский, 1928; Филенко, 1966; Ресурсы поверхностных вод, 1972; Кириллова, 1974; Ильина, Грахов, 1987].

Месторасположение исследуемого региона показано на ситуационном плане (рисунок 1).

[1] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.
Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.

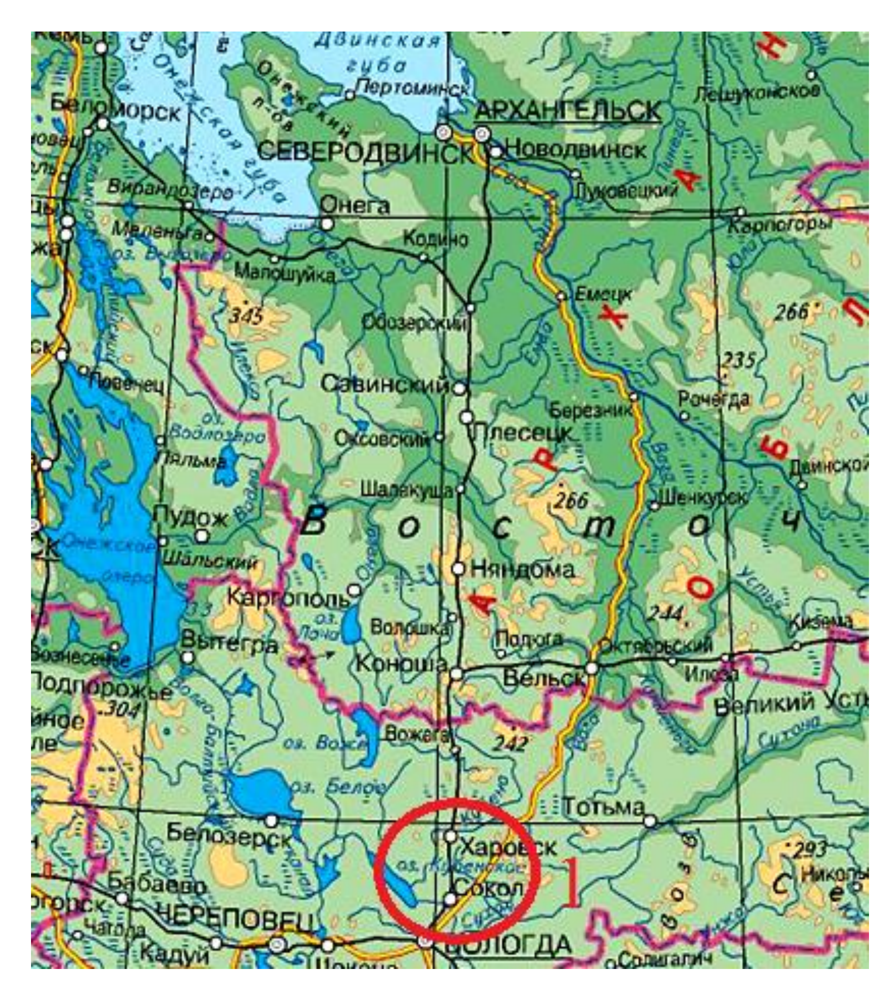


Рисунок 1. Ситуационный план месторасположения территории (1) исследуемого объекта[2]

Figure 1. Situational plan for the location (1) of the investigated object

Объектом исследования является гидрологический режим водотоков в пределах гидрографической сети Верхней Сухоны (рисунок 2) в период обратного стока реки, приуроченного к весеннему половодью.

Авторы отмечают, что основной причиной обратного стока являются:

1) особенности рельефа исследуемой территории, сформировавшиеся в процессе позднечетвертичного послеледникового периода;

2) существенная асинхронность в прохождении весеннего половодья на основных водотоках, питающих Кубенское озеро.

Гидрографическая сеть рассматриваемой территории претерпела в геологической истории сильные изменения во время московской и валдайской стадий оледенения и последующей деградации ледников.

[2] Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

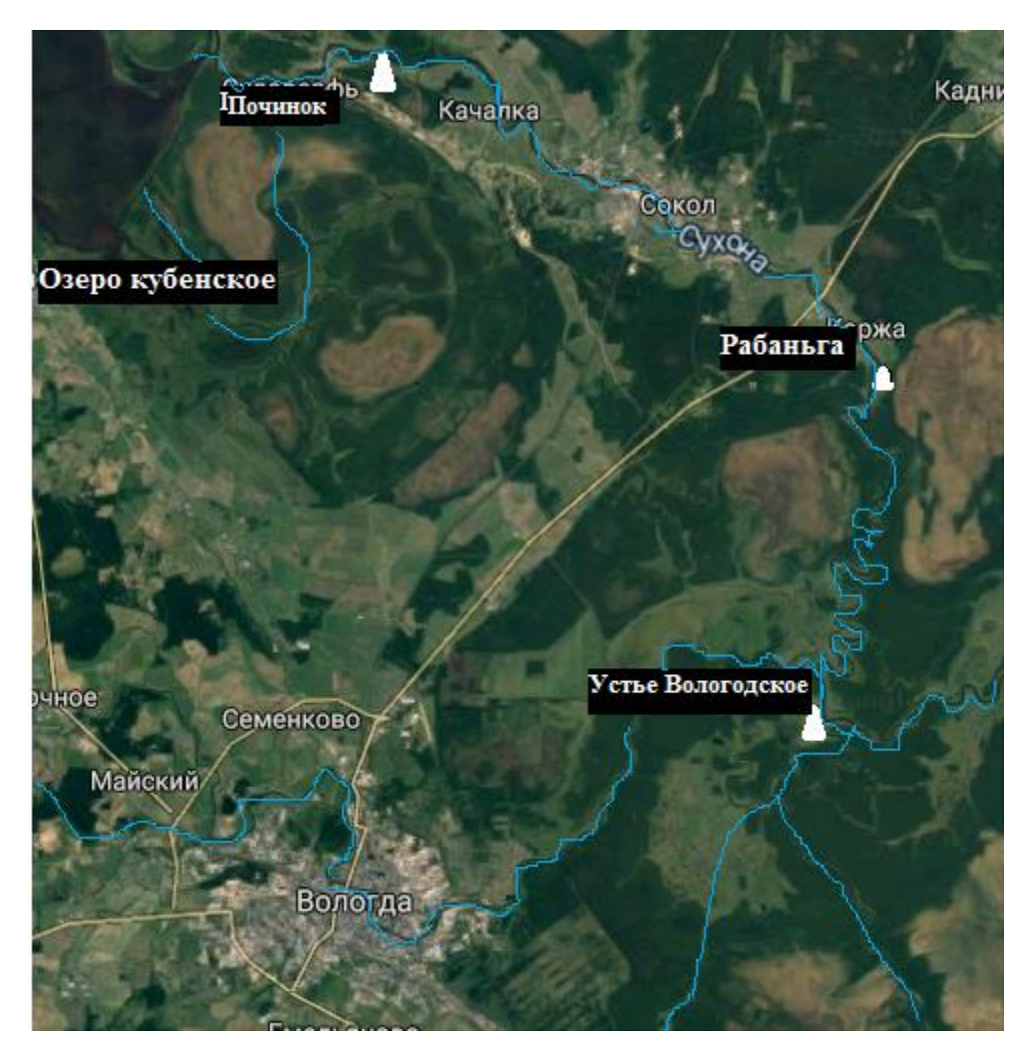


Рисунок 2. Космоснимок части водосбора реки Верхняя Сухона, южной акватории озера Кубенское и устьевой части реки Лежа. Источник: https://www.google.com/maps

Figure 2. Satellite photo of the uppermost part of the Sukhona River and its watershed, the southern part of Lake Kubenskoye and the estuary of the Lezha River.

Source of information: https://www.google.com/maps

Как отмечает Р.И. Филенко [Филенко, 1966] «…что касается современной долины реки Сухоны, то она в послеледниковый период не оставалась постоянной. По мнению геологов, в послеледниковый период были две Сухоны: Западная Сухона, впадающая в Кубенское озеро, верховьями которой служила река Уфтюга, а небольшая часть современной Сухоны ниже Уфтюги была лишь её притоком, и Восточная Сухона, протекавшая с запада на восток. Эти две реки разделялись плоско-возвышенным слабодренированным пространством. В процессе развития гидрографической сети, врезания и отступания верховьев Восточная Сухона соединилась с притоком древнего Кубенского озера… Восточная Сухона, имевшая более низкий базис эрозии (Белое море), перехватывала шаг за шагом все большую и большую

часть Западной Сухоны и спустила озеро, занимавшее Кубено-Сухонскую низину. Озеро (современное Кубенское) осталось лишь в её наиболее глубокой части бывшего озерно-ледникового водоёма».

На современных космоснимках поверхности исследуемого региона отчётливо просматривается осушённое ложе в южной части озера, опоясанное древним береговым валом. Видно, что Верхняя Сухона большей частью протекает по северной окраине Прикубенской низины. Протока Большой Пучкас протекает по дну этой котловины в центральной её части (рисунок 2).

Именно это обстоятельство обуславливает крайне низкие уклоны дна и, соответственно, свободной поверхности руслового потока реки Верхняя Сухона. Обычно они не превышают 0,0020-0,0040 в меженный период.

Об этом упоминается и в работе [Ильина, Грахов, 1987]: «…очертания речной долины на этом участке расплывчаты и неясны, местность вокруг плоская, болотистая, падение реки от истока до устья реки Вологды составляет всего несколько сантиметров на километр пути… Падение Средней Сухоны примерно на порядок выше, чем Рабаньгской. На 95-километровом участке от устья реки Ихалицы до города Тотьмы оно составляет 4,33 м, тогда как на протяжении 56 км Верхней Сухоны — всего 0,26 м… Из-за малого уклона русла в годы, когда Вологда и Лежа вскрываются раньше Кубенского озера, Сухона под напором их вод, бывает, поворачивает вспять. По неделе, а иногда и по две, течёт она к Кубенскому озеру, если на нем продолжает сохраняться низкий, меженный уровень воды». Авторы имеют в виду зимний меженный уровень, обычно устанавливающийся на озере к концу марта.

После створа д. Рабаньги река Сухона протекает по Присухонской низине и в районе створа д. Устье-Вологодское принимает справа два крупных притока – реку Вологду, несущую свои воды с юго-востока и реку Лежа, текущую в меридиональном, северном направлении. Водосборы этих притоков лежат на северном приводораздельном склоне большого водораздела Белого и Каспийского морей. Снеготаяние и водоотдача начинается на этих более южных водосборах на одну-две недели раньше, чем на основном притоке озера – реке Кубене. Водосбор реки Кубены расположен значительно севернее, её исток расположен в Архангельской области.

Рассмотрим более детально, с использованием основных гидрологических показателей, процесс обратного течения на участке гидрографической сети Верхней Сухоны от устья реки Вологды и реки Лежа до южной акватории Кубенского озера (рисунок 2).

Состояние проблемы и использованная информация

Основной проблемой, вызвавшей необходимость проведения исследований, является отсутствие информации о величине и порядке гидрологических и гидравлических параметров исследуемого явления приемлемой точности, достаточной для формулирования обоснованных выводов и принятия управленческих решений.

К проблеме можно отнести и отсутствие знаний о реальности риска ухудшения качества вод гидроэкосистемы южной акватории Кубенского озера вследствие обратного течения, а также об отсутствии достаточного информационного обоснования реальности этой угрозы.

Поскольку озеро Кубенское после строительства комплекса гидротехнических водозаборных сооружений является одним из источников питьевого и технического водоснабжения города Вологды, то это, безусловно, обуславливает большое жизненное значение озера для областного центра, и требует детального исследования его гидроэкологических и водохозяйственных особенностей (рисунок 3).

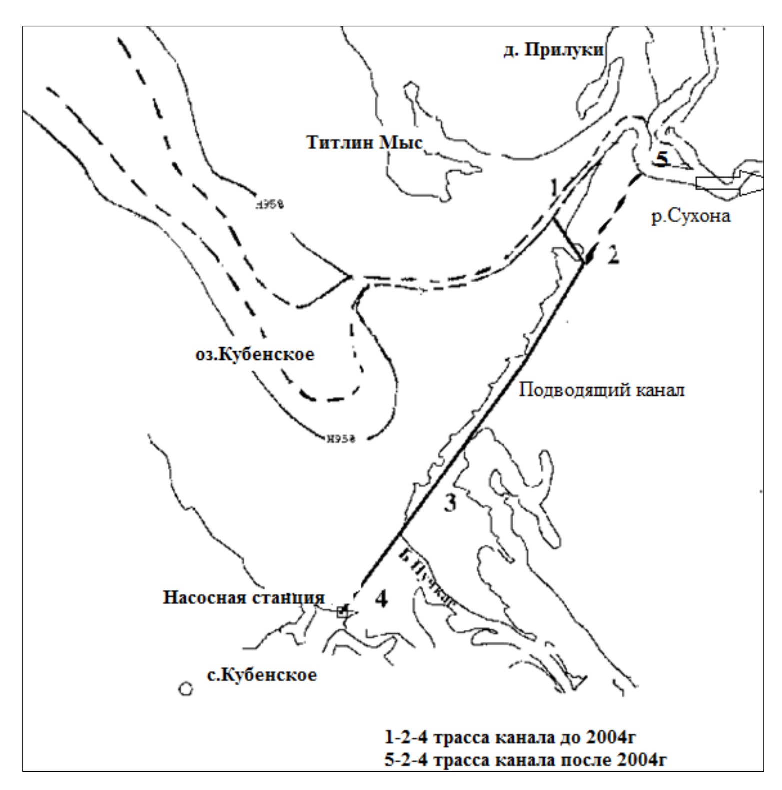


Рисунок 3. Ситуационный план месторасположения подводящего канала насосной станции водоподачи в город Вологду

Figure 3. Plan for the location of the inlet channel of the water supply pumping station in the city of Vologda

Гидрометеорологическая информация, использованная в настоящем исследовании, складывается из данных наблюдений по сети метеорологических и гидрологических станций Северного управления гидрометслужбы (СУГКС), данных наблюдений на ведомственных постах [Ресурсы поверхностных вод, 1972], и результатов полевых измерений, полученных в рамках научно-исследовательских работ при участии автора[3].

В частности, соответствующие расчёты и анализ основных гидрологических и гидравлических характеристик процесса обратного течения реки Верхней Сухоны с использованием методов математической статистики стали возможными благодаря выполненным проектно-изыскательским институтом «Вологдаинжпроект» в течение 1981-1986 гг. уникальным полевым гидрометрическим измерениям в створах: река Сухона – д. Починок, д. Устье-Вологодское, река Лежа – д. Лобково. Эти посты были открыты в рамках обширных проектно-изыскательских работ для разработки технико-экономического обоснования «Проекта переброски части стока северных рек в бассейн реки Волга».

Использованы материалы наблюдений СУГКС на реке Сухоне у д. Рабаньга, а также данные по уровням воды на водомерном посту река Сухона – шлюз Знаменитый Вологодского района водных путей. Это пост с самой большой (более 100 лет) продолжительностью ряда наблюдённых величин уровней воды [Ресурсы поверхностных вод, 1972].

Расположение опорных водомерных постов, данные по которым легли в основу исходной информации при исследовании, показано на рисунке 4.

[3] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.
Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.
Определение возможности поступления стоков животноводческого комплекса «Дубровское» в водовод Кубенское-Вологда через грунтовые воды: отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый Вологда: МП «ЭПИР», 1991. 50 с.

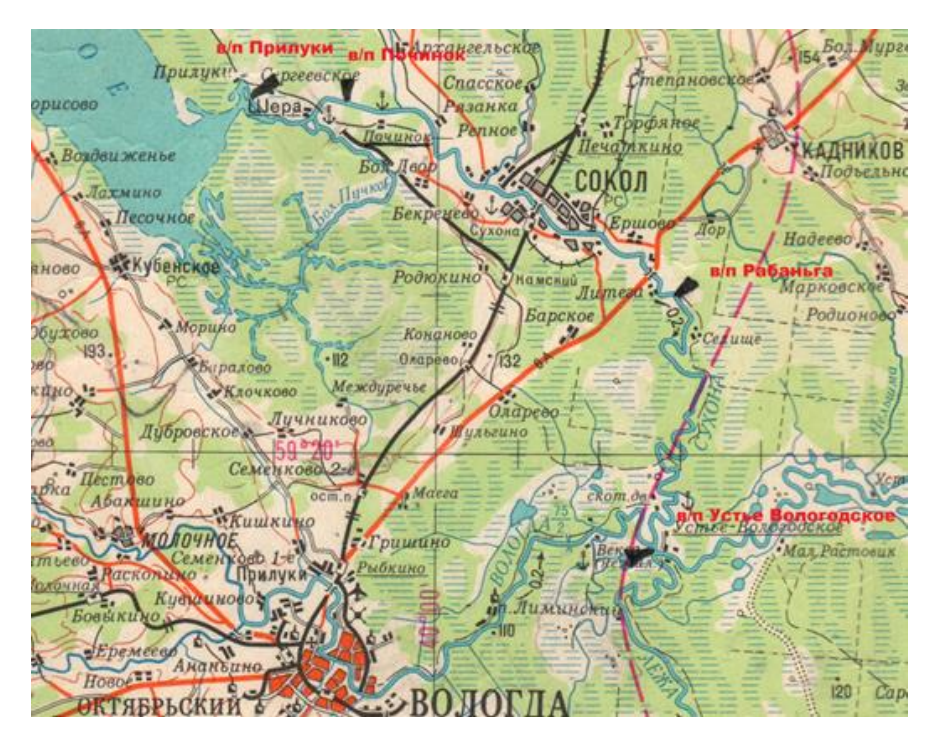


Рисунок 4. Карта-схема гидрологических постов на реке Сухоне, информация по которым была использована при анализе обратного течения[4]

Figure 4. Map of hydrological posts on the Sukhona River, information on which was used in the analysis of the reverse flow

Результаты исследования основных гидрологических характеристик обратного стока

Гидравлическую сущность формирования противотечения можно видеть на комплексном графике хода уровней весеннего половодья на опорных водомерных постах. На рисунке 5 показана динамика уровней воды и изменение во времени взаимного высотного положения уровней, изменяющихся в процессе обратного стока. На указанном рисунке показано соотношение отметок уровней воды, приведённых к Балтийской системе высот, измеренных на водомерных постах д. Починок, д. Рабаньга и д. Устье-Вологодское в период весеннего половодья 1983 года.

[4] Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

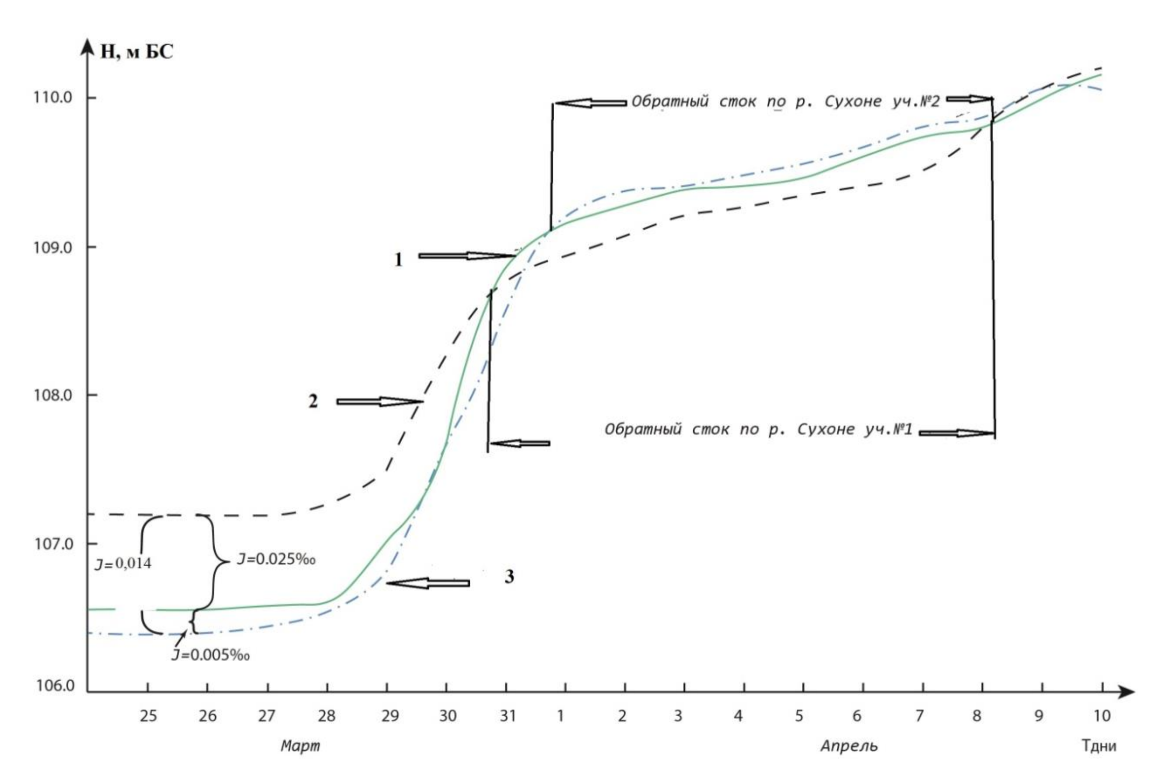


Рисунок 5. График хода уровней воды на р. Сухоне в период подъёма весеннего половодья 1983 года на водомерных постах: д. Рабаньга (1), д. Починок (2) и д. Устье-Вологодское (3)

Figure 5. Plot of water level curves on the Sukhona River during the spring flood raised in 1983 at Rabanga (1), Pochinok (2), and Ustye-Vologodskoye (3) water gauging stations

Результаты расчёта уклонов свободной поверхности руслового потока с использованием этих графиков показывают, что на исследуемых участках реки вначале наблюдаются положительные уклоны (в соответствии с каноническим направлением течения реки Сухоны). На выделяемых участках русла уклон составил (промилле): водомерный пост Починок – водомерный пост Рабаньга – 0,025; водомерный пост Починок – водомерный пост Устье-Вологодское – 0,014; водомерный пост Рабаньга – водомерный пост Устье-Вологодское – 0,005.

С развитием половодья на двух нижних створах (водомерные посты Рабаньга и Устье-Вологодское) скорость подъёма уровней опережает скорость подъёма в створе водомерного поста Починок, что приводит к возникновению гидравлического подпора с отрицательным уклоном, равным 0,009 промилле. Через двое суток отрицательный уклон водной поверхности сформировался и на участке водомерный пост Рабаньга – водомерный пост Починок и составил 0,002 промилле (рисунок 5).

На дату 8 апреля 1983 г. подпор, вследствие заполнения озера Кубенского талыми водами основного притока – реки Кубены и объёмами обратного стока, обратный сток остановился, и река Сухона пошла в обычном направлении.

На основе анализа всех материалов гидрометрических измерений института «Вологдагипроводхоз» за 1981-1986 гг. установлено, что обратное течение реки Сухоны всегда начинается на участке д. Починок – д. Рабаньга вероятнее всего от города Сокола, где река Сухона принимает левобережные притоки – реку Бохтюгу и реку Глушицу.

Данные краткосрочных наблюдений на гидрологических постах у д. Починок (1981-1985 гг.) и длительный ряд наблюдений у д. Рабаньга позволили дать оценку гидрологических характеристик обратного стока реки Сухоны в многолетнем разрезе.

Для этого данные наблюдений по водомерном посту Рабаньга были обработаны стандартными методами математической статистики[5].

Кривые обеспеченности построены для следующих рядов: продолжительность обратного стока ($T_{от}$), средние расходы за период обратного стока ($Q_{от}$), объёмы обратного стока ($W_{от}$). Часть ординат этих кривых для квантилей заданной расчётной вероятности превышения представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Величины продолжительности обратного течения и суммарных объёмов воды за период обратного стока реки Сухоны в озеро Кубенское на основе расчётных вероятностей превышения

Table 1. The values of duration of the reverse flow and total water volumes for the period of the return flow of the Sukhona River to Lake Kubenskoye of the estimated probabilities of exceeding

Створ	Продолжительность обратного течения, $T_{от}$, сутки					Объёмы обратного течения, $W_{от}$, млн. м^3				
	1%	10%	25%	50%	$T_{сред.}$	1%	10%	25%	50%	$W_{сред.}$
Река Сухона – д. Рабаньга	18	13,7	11,0	8,3	8,0	132	96,0	70,0	49,0	53,5
Река Сухона – д. Починок	18	13,7	11,0	8,3	8,0	292	182	126,0	76,0	78,0

[5] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.

Таблица 2. Расчётные расходы воды и средние скорости течения реки Сухоны при обратном течении

Table 2. Estimated water flow rates and average flow rates of the Sukhona River in the reverse flow

Створ	Расходы воды, м³/с					Скорости течения, м/с				
	1%	10%	25%	50%	$Q_{сред.}$	1%	10%	25%	50%	$V_{сред}$
Река Сухона – д. Рабаньга	146	108	87,0	66	68,8	0,21	0,16	0,14	0,11	0,11
Река Сухона – д. Починок	188	152	132	110	114	0,33	0,27	0,23	0,2	0,21

Выявление эмпирической корреляционной связи расходов обратного стока в створе водомерного поста Рабаньга с сопряжёнными с ними расходами воды в створе река Сухона – водомерный пост Починок, условно принимаемого нами за исток реки Сухоны, позволил оценить характеристики такой же обеспеченности в створе д. Починок (рисунок 6).

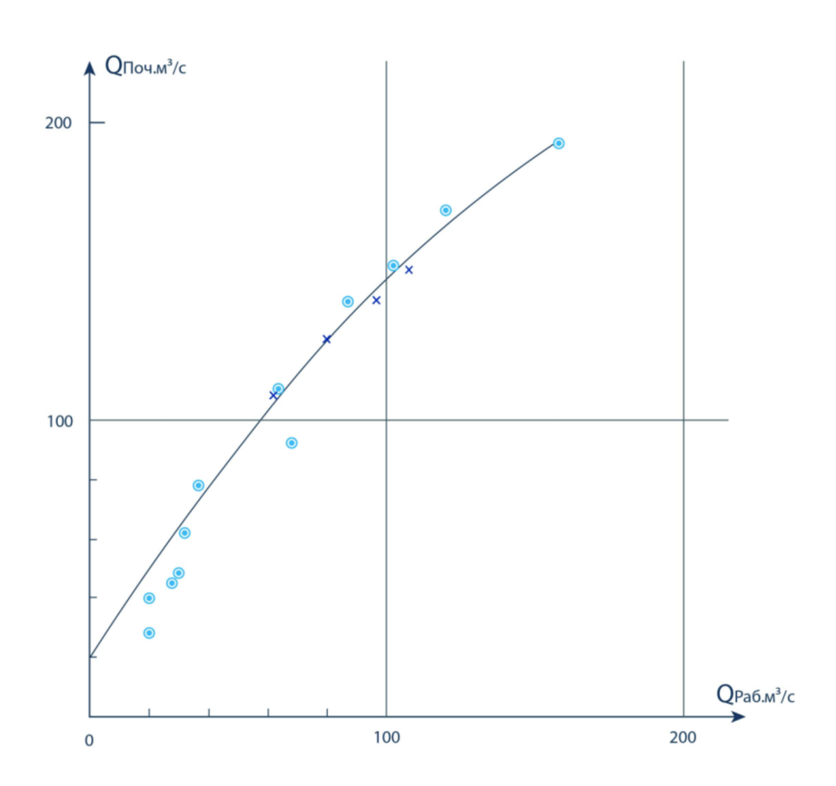


Рисунок 6. Эмпирическая зависимость расходов воды реки Сухоны по данным водомерного поста Починок от соответствующих расходов реки Сухоны на водомерном посту Рабаньга

Figure 6. The empirical dependence of the Sukhona River water discharge according to the Pochinok water metering station from the corresponding the Sukhona River water discharge at the Rabanga water metering station

Статистические характеристики продолжительности и объёмов обратного стока, полученные указанным способом для обоих учётных створов, представлены в таблице 1.

Установлено, что в среднемноголетнем разрезе обратный сток начинается 14 апреля, при наиболее ранней дате – 1 апреля (1968 г.) и поздней дате – 3 мая (1974 г.). Объёмы стока различной обеспеченности в сторону озера возрастают, что объясняется боковой приточностью и русловыми запасами самой реки. Средний многолетний боковой приток на участке д. Рабаньга – исток реки Сухоны в виде среднего расхода за время существования обратного течения равен 35,4 м^3/с.

Учитывая, что в оценённых выше объёмах стока значительную часть занимают недостаточно очищенные стоки городов Вологды и Сокола, можно предположить, что эти воды могут явиться фактором ухудшения качества озёрных вод в зоне влияния противотечения.

Поэтому вначале следует ответить на важный вопрос, успевают ли воды реки Вологды достигнуть озера прежде, чем река Сухона потечёт обычным образом?

Ответить на это возможно расчётами временных и гидравлических характеристик, обеспечивающих движение водных масс при обратном стоке. Одной из этих характеристик является время руслового добегания. Время руслового добегания (t_r), как известно, определяется по формуле

$$t_r = l/v \tag{1}$$

где l – длина расчётного участка реки, км;

v – средняя скорость течения на расчётном участке.

Нивелирование водной поверхности в составе гидрометрических полевых изысканий, выполненных проектно-изыскательским институтом «Вологдаинжпроект», показали, что значения продольных уклонов свободной поверхности реки Сухоны в период обратного течения достигают 0,002-0,003 промилле, увеличиваясь по ходу в сторону озера Кубенского. Средние скорости по живому сечению потока также адекватно растут по длине реки в сторону озера (рисунок 7).

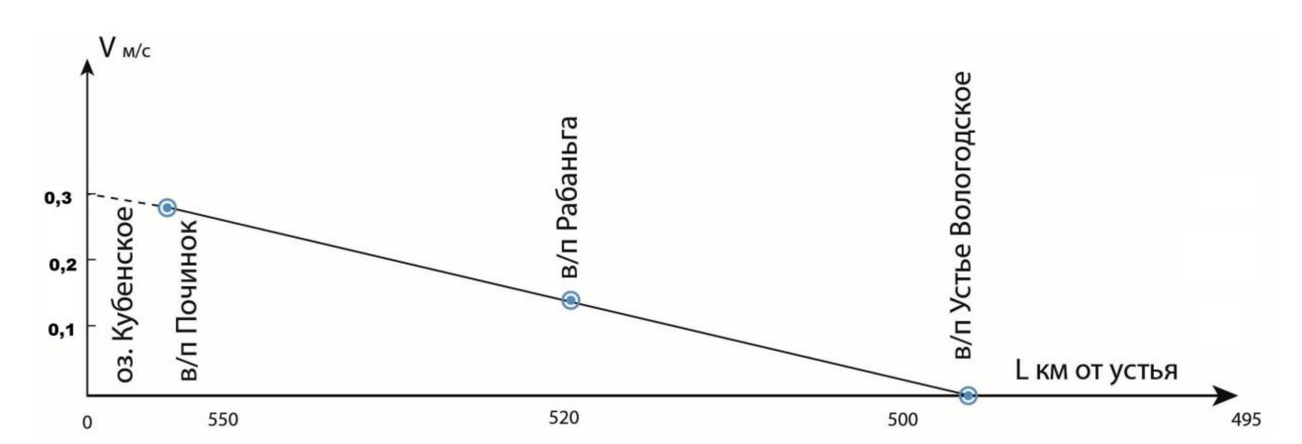


Рисунок 7. Изменение средней скорости течения по живому сечению потока при максимальных расходах обратного стока 10% вероятности превышения

Figure 7. The change in average flow of velocity over the living cross section of the flow at maximum flow rates of the return flow 10% probability of exceeding

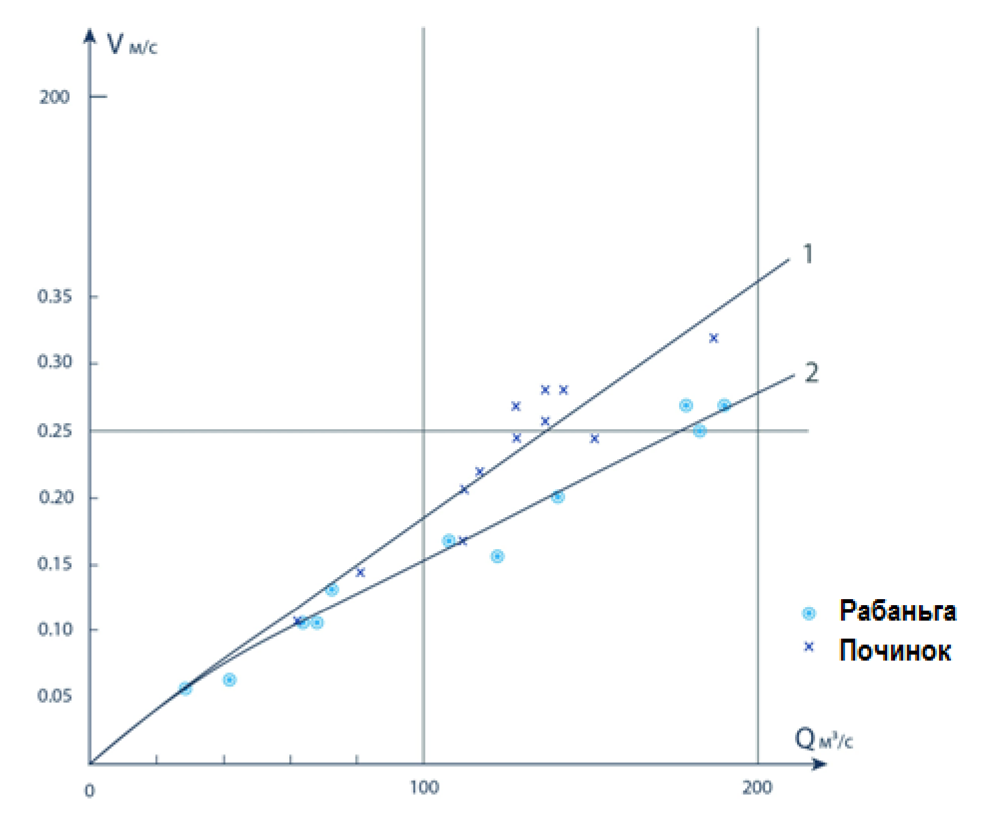


Рисунок 8. График зависимости средних по живому сечению скоростей обратного течения (V, м/с) от расходов обратного стока (Q, м^3/с).

1 – водомерный пост Рабаньга, 2 – водомерный пост Починок

Figure 8. Graph of the dependence of the mean cross-sectional velocity of the reverse flow (V, m/s) on the flow rate of the return flow (Q, m^3/s). 1 – water post Rabanga, 2 – water post Pochinok

Это хорошо просматривается на совмещённом графике зависимости скоростей от расходов воды, представленном на рисунке 8. Скорости течения в створе водомерного поста д. Починок, расположенного ближе к озеру, существенного больше скоростей на водомерном посту Рабаньга, если сравнивать их при одних и тех же расходах воды.

Среднее время руслового добегания реки Сухоны, рассчитанное по формуле (1), при скоростях, соответствующих расходам 10% обеспеченности, составило: на участке д. Устье-Вологодское – д. Рабаньга – 4,63 сут., на участке д. Рабаньга – д. Починок – 1,54 сут., на участке д. Починок – озеро Кубенское – 0,25 сут. Суммарное время составляет, таким образом, 6,42 сут.

Если общая продолжительность обратного стока 10% обеспеченности на участке Устье-Вологодское – д. Починок составила 13,7 сут. (таблица 1), то риск того, что часть загрязнённого талого стока с бассейна реки Вологды в этом случае достигнет акватории озера Кубенского вполне вероятен.

В этом случае возникает практический интерес к оценке дальности проникновения по акватории озера Кубенского вод реки Сухоны, предположительно несущих с собой стоки с селитебных и промышленных зон городов Вологды и Сокола.

Похожая задача решалась Институтом озероведения АН СССР в 1974 году для определения вероятной зоны распространения в озеро стока самого большого по водности притока озера – реки Кубены [Озеро Кубенское, 1977].

Расчётная математическая модель была представлена в следующем виде:

$$V_{ox} = V_o e^{-k\beta} \qquad (2)$$

где $\beta = \frac{xH}{B_o\, H_o}$;

V_{ox} – средняя скорость течения в речной струе на расстоянии x от начального створа;

V_o, H_o, B_o – средние скорость, глубина и ширина в начальном створе, соответственно;

H – средняя глубина на участке растекания струи;

k – эмпирический коэффициент, интегрально учитывающий потери энергии в речной струе на трение о дно и боковые поверхности русла $k = 0{,}38\, \beta^{-0{,}6}$.

При использовании этого подхода применительно к исследуемому процессу обратного стока реки Сухоны получено, что при расходах 10% вероятности превышения (рисунок 7, V_0=0,29 м/с) зона влияния обратного течения составляет около 2,5-3,0 км, при средних расходах 2,0 км.

Этого вполне достаточно для того, чтобы предположить, что исток подводящего канала для водозабора города Вологды из озеро Кубенское (рисунок 3), с большой вероятностью окажется в зоне влияния вод обратного стока, транспортирующих загрязняющие вещества стоков городов Вологды и Сокола.

В этом смысле количественная оценка характеристик твёрдого «обратного» стока представляет, как упоминалось выше, практический интерес, поскольку значительная часть взвешенных наносов верховьев реки Сухоны пополняется упомянутыми сбросами сточных вод.

Далее рассмотрен транспорт влекомых и взвешенных русловых наносов, называемых в дальнейшем «твёрдым стоком».

Для решения этой задачи воспользуемся полученными выше вероятностными характеристиками объёмов «обратного жидкого стока» (таблица 1).

С использование данных гидрологических измерений установлена эмпирическая зависимость объёмов твёрдого стока для створа река Сухона – д. Починок (рисунок 9).

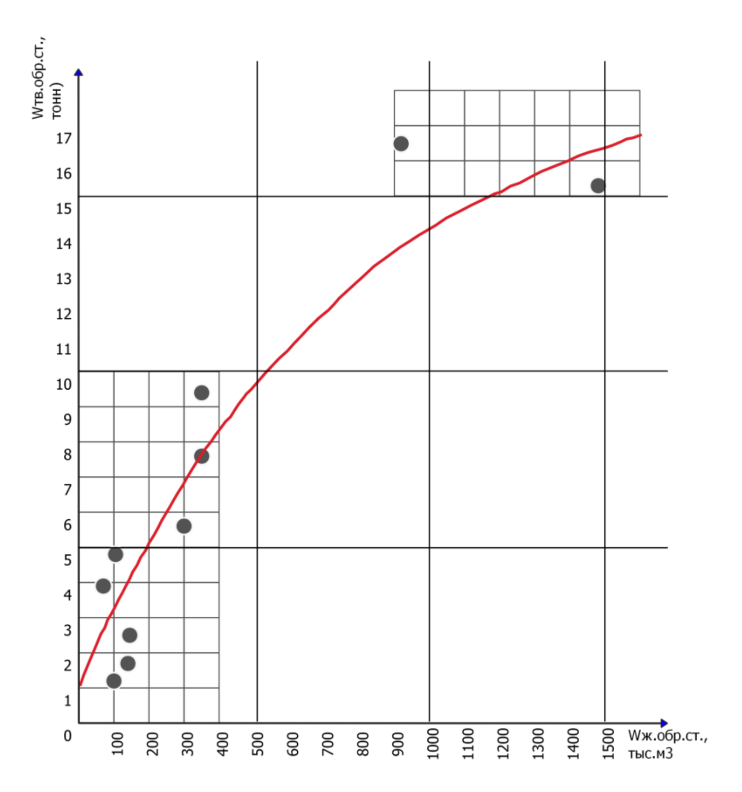


Рисунок 9. График связи объёмов твёрдого стока от расходов обратного стока на реке Сухоне в створе водомерного поста Починок

Figure 9. Plot of relationship between volumes of solid runoff and the costs of the return flow on the Sukhona River in the alignment of water post Pochinok

С привлечением среднемноголетних значений расходов (таблица 2) и с помощью графика зависимости (рисунок 9) выполнены расчёты объёма твёрдого стока различной обеспеченности и соответствующие им величины средней мутности. Результаты этих оценочных расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики твёрдого стока в озеро Кубенское при обратном течении реки Сухоны

Table 3. Characteristics of solid runoff into Lake Kubenskoye in the reverse course of the Sukhona River

Створ	Объёмы взвешенных наносов, тыс. тонн				Средняя мутность, г/м^3			
	10%	25%	50%	норма	10%	25%	50%	норма
Река Сухона – д. Починок	1,62	1,45	1,18	1,44	8,87	12,2	15,6	18,5

Видно, что с увеличением объёма обратного течения возрастает и разбавляющая способность реки, опережая прирост объёма твёрдого стока, о чём свидетельствуют данные, представленные в таблице 3. Видно, что концентрация взвешенных наносов устойчиво снижается с увеличением объёмов жидкого и твёрдого стока.

В целом можно сделать вывод, что транспорт наносов в озеро Кубенское существенен и составляет в среднемноголетнем разрезе 1,4 тысяч тонн в год. Процессы аккумуляции этих наносов и характер их распространения в акватории юго-восточной части озера требует дополнительного изучения. Особое значение здесь имеет анализ химического состава этих наносов, и их воздействия на качество вод озера в маловодный период.

Результаты гидрохимических исследований реки Сухоны в период обратного стока

Учитывая большое хозяйственное значение озера Кубенского для областного центра города Вологда и Вологодской области в целом, остро встал вопрос о необходимости включения в комплексные исследования озера экологических и гидрохимических изысканий.

В этой связи собраны и обобщены материалы гидрохимических наблюдений СУГКС, результаты планового контроля комитета по экологии, областного и районных центров санэпидемнадзора (ЦСЭН). Также были использованы результаты изысканий проектно-

изыскательского института «Вологдаинжпроект»[6] и организации «ЭПИР» (Экология, проектно-изыскательские работы)[7], выполненных ранее для оценки некоторых локальных процессов загрязнения вод в южной части озера и рек Прикубенской низины.

Для определения показателей качества вод озера Кубенского и реки Верхней Сухоны в период её обратного течения при участии автора были проведены необходимые гидрохимические измерения и обследования.

В период весеннего половодья 1994 г. произведён отбор проб и выполнен лабораторный гидрохимический анализ вод на участке реки Сухоны от города Сокола до начала подводящего канала водовода. Пробы воды на гидрохимический и санитарно-бактериологический анализы отобраны в ряде пунктов (рисунок 10).

Первые четыре пункта характеризуют изменение количественных показателей качества воды во время обратного течения на участке реки Сухоны от города Сокола до места водозабора для города Вологды. Пятая точка отбора характеризует район водозабора со стороны с. Кубенское и возможное изменение показателей качества вод озера Кубенского в случае формирования обратного течения в озеро по протоке Большой Пучкас.

Отборы проб воды были проведены в период с 6 по 20 апреля 1994 года. Обратное течение реки Сухоны в тот год началось 11 апреля и продолжалось 9 суток. Как показано выше, среднее расчётное время добегания водной массы на участке водомерный пост Устье-Вологодское – озеро Кубенское составляет более 6 суток, таким образом можно считать, что в данном случае обратный сток достигнет истока реки Сухоны, то есть акватории озера Кубенского.

Гидравлические характеристики обратного стока, зафиксированные автором во время полевого обследования 18.04.1994 г. в створе шлюза Знаменитый: $V_{пов}$=0,5 м/с, уровень воды в верхнем бьефе 108,7 м БС, Q = 89,8 $м^3/с$, близки к средним.

Рекогносцировочное обследование протоки Большой Пучкас показало, что течение по ней не наблюдалось в сторону реки Сухоны даже в период наиболее интенсивного обратного течения последней 18-20.04.1994 г.

---

[6] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.

[7] Определение возможности поступления стоков животноводческого комплекса «Дубровское» в водовод Кубенское-Вологда через грунтовые воды: отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый Вологда: МП «ЭПИР», 1991. 50 с.



Рисунок 10. Схема расположения пунктов отбора проб на гидрохимический анализ воды реки Сухоны во время весеннего половодья 1994 г.[8]:

1. Река Сухона – д. Когаш (водозабор города Сокола);

2.Река Сухона – п. Шера (в створе шлюза Знаменитый);

3. Река Сухона – д. Прилуки (входной створ в озеро);

4. Озеро Кубенское – начало подводящего канала (0,5км от берега);

5. Исток протоки Большой Пучкас в створе насосной станции водозабора

Figure 10. The map of the sampling points for hydrochemical analysis of the Sukhona River during the 1994 spring flood: 1. R. Sukhona – village Kogash (water intake of the city Sokol);

2. R. Sukhona – p. Shera (in the site of the gateway Znamenity);

3. R. Sukhona – village Priluki (entrance target to the lake);

4. Oz. Kubenskoye – the beginning of the supply channel (0.5 km from the coast);

5. Source of the river Bolshoy Puchkas at the site of the pumping station of the water intake)

[8] Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

С целью анализа динамики гидрохимической ситуации по учётным створам реки Сухоны и озера Кубенского необходимые гидрохимические показатели определялись в период отдельных фаз весеннего половодья:

а) до начала обратного течения;

б) во время обратного течения;

в) по окончании обратного течения.

Установлено, что до начала обратного течения показатели качества стока из озера Кубенского практически по всем ингредиентам не выходят за пределы ПДК[9].

Ниже города Сокола (д. Кузнецово) концентрации загрязняющих веществ несколько возрастают, что можно связать с талым стоком с территории города. Некоторые данные представлены в таблице 4.

Таблица 4. Изменение показателей качеств воды реки Сухоны в период талого стока с территории города Сокола

Table 4. Change in water quality indicators of the Sukhona River during melt runoff from territory of the city Sokol

Показатели	Значения показателей на 6.04.1994	
	Выше города Сокола	Ниже города Сокола
Биохимическое потребление кислорода ($БПК_{полн}$), мг·O_2/л	3,6	6,8
Взвешенные вещества, мг/л	0,4	1,4
Коли-индекс, экз./100мл	2400	24000
Хлориды, мг/л	7,5	12,5
Общая минерализация, мг/л	319,2	342,8
pH	7,5	7,6
Нитраты мг/л	2,6	2,9
Сульфаты мг/л	40	40

После начала обратного течения, Сокольской лабораторией ЦСЭН были отобраны повторные пробы воды в этих же пунктах. Данные лабораторных анализов проб воды, взятых

[9] Влияние деятельности ТОО «Фетинино» на качество водных ресурсов озера Кубенского: Отчёт о НИР / Отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 78 с.

18.04.1994, свидетельствуют об ухудшении качества воды реки Сухоны в сторону озера Кубенского.

У д. Кузнецово (выше города при обратном течении) взвешенные вещества превысили ПДК в 10 раз, нитриты – в 1,2 раза, концентрация свинца уменьшилась и составила 0,11 мг/л, а в створе водозабора (ниже города при обратном течении) концентрация свинца возросла до 0,9 мг/л (1,2 ПДК). Появляются фенолы в концентрации 2,1 ПДК.

Аналогичные либо близкие результаты аналитического контроля получены лабораторией муниципального предприятия «Горводоканал» города Вологды для створа реки Сухона – д. Когаш 18.04.1994. По их данным получено: взвешенные вещества – превышение около двух ПДК, свинец не обнаружен, но зафиксированы нефтепродукты в количестве 4,0 ПДК.

Естественно различия цифровых показателей качества воды связаны с очевидной дискретностью наблюдений на фоне высокой турбулентности руслового потока.

Тем не менее можно говорить об устойчивой тенденции загрязнения талых вод реки Сухоны именно в результате поворота её потока вспять. Результаты анализа данных по гидрохимии за 1991-1993 гг. свидетельствуют в пользу этого предположения (таблица 5).

Таблица 5. Показатели качества воды (в долях ПДК) реки Сухоны в створе д. Когаш при прямом течении (числитель) и при обратном течении (знаменатель)[10]

Table 5. Water quality indicators (in fractions of MPC) of the Sukhona River in the alignment of the village Kogash with a direct flow (numerator) and with a reverse flow (denominator)

Показатели	Доли ПДК		
	1991 г.	1992 г.	1993 г.
Взвешенные вещества	0,0 / 1,4	0,0 / 1,45	0,35 / 3,1
Биохимическое потребление кислорода ($БПК_{полн}$)	1,13 / 0,5	0,26 / 1,28	0,9 / 1,12
Азот аммонийный	0,0 / 1,24	0,0 / 1,06	0,0 / 0,8
Лактозоположительные кишечные палочки (ЛКП)	1,5 / 1,4	1,1 / 1,4	0,0 / 0,0

Следует отметить, что перемещение наносов по руслу реки Сухоны происходит во взвешенном состоянии, сальтацией и влечением по дну. При этом, как правило, на дне

[10] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.

образуются различные русловые формы – рифели, гряды. Размеры таких форм изменяются от нескольких сантиметров до нескольких метров. По поверхности гряд чаще всего передвигаются формы длиной от 1-2 м до самых мелких рифелей, длина которых не превышает 10-20 см. В общем русловые формы принято делить на макро-, мезо- и микроформы [Дедков, Мозжерин, 1984].

Формирование русловых форм определяется основными гидравлическими характеристиками потока – скоростью, направлением течения, интенсивностью пульсации. При установившемся режиме потока на дне реки образуется набор русловых форм из материала донных отложений.

При достаточно быстрой смене направления течения реки на противоположное, как это имеет место на реке Сухоне, возможно начало достаточно интенсивной перестройки русловых мезо- и микроформ. Этот процесс дополнительно вовлекает в твёрдый сток значительное количество взвешенных наносов, которые благодаря относительно небольшому расстоянию до озера вполне его достигают.

Изменение концентрации взвешенных наносов по длине реки в сторону озера, подтверждает это предположение. Величины концентраций изменяются от 7,7 до 19,5 мг/л на участке от города Сокола до водозабора для города Вологды. Учитывая высокую адсорбционную способность взвешенных частиц, можно говорить и об увеличении переноса соединений тяжёлых металлов в озеро, до этого консолидированных в толще донных отложений. Предположительно мы имеем дело с фактом вторичного загрязнения вод Верхней Сухоны ингредиентами, вымываемыми из донных отложений при обратном течении.

В качестве подтверждения этого предположения можно привести резкое возрастание концентрации марганца при обратном стоке – с 0,078 до 0,8 мг/л. Здесь, конечно, можно говорить о совпадении двух процессов – вовлечения в русловый поток взвесей, адсорбировавших марганец, и усиление окислительно-восстановительного процесса, определяемого высоким содержанием растворенного кислорода в талых водах.

К природным источникам марганца, кроме упомянутых, можно отнести прилегающие заболоченные пойменные территории, характерные кислой реакцией среды, где интенсивно протекают процессы микробиологического восстановления марганца до двухвалентного, в результате чего подвижность марганца повышается, особенно в виде органоминеральных комплексов.

Обращает на себя факт обнаружения в воде довольно редкого металла – молибдена. В пункте д. Когаш его концентрация составила 0,008 мг/л (6,7 ПДК), в начале подводящего

канала – 0,035 мг/л (29,2 ПДК). Факты обнаружения молибдена в воде, поступающей на очистные сооружения системы водоснабжения города Вологды, отмечаются в плановых пробах лаборатории муниципального предприятия «Горводоканал» в концентрациях 0,005-0,008 мг/л. Поскольку по значению кларка в земной коре молибден находится от конца на седьмом месте после золота, трудно предположить природное происхождение этого микроэлемента.

По всему транзитному участку реки Сухоны прослеживаются нефтепродукты в концентрации около 4,0 ПДК, за исключением точки отбора у начала подводящего канала. По мере приближения к озеру снижается концентрация синтетических поверхностно-активных веществ с 0,34 мг/л у города Сокола до 0,09 мг/л у истока подводящего канала. Отмечается некоторое повышение аммония солевого – NH_4^+ до 1,5 ПДК, $БПК_{полн.}$ изменяется от 3,8 до 5,4 мг·O_2/л.

Санитарно-бактериологическое исследование проб воды реки Сухоны и озера Кубенского 18-20.04.1994 свидетельствует о допустимом либо умеренном загрязнении. Так показатель *ЛКП* (лактозоположительные *кишечные палочки)* изменяется от 4600 до 23000 ед./мл, ОМЧ (общемикробное число) от 50 до 300 ед./мл, хотя до города Сокола (д. Кузнецово) ситуация несколько хуже: ЛКП – 240000 ед./мл, коли-индекс 240000 ед./л. Большинство показателей качества воды относительно рыбохозяйственного лимитирующего показателя вредности находятся в пределах изменений фоновых значений.

Качество воды в истоке протоки Большой Пучкас в створе насосной станции по большинству показателей не выходит за пределы требований ГОСТа «Вода питьевая». Визуальное наблюдение за ареалом распространения обратного стока показало, что воды реки Сухоны не достигают этого пункта и не влияют на изменение качественных показателей воды.

Анализ проб воды реки Сухоны по окончании обратного течения, выполненный лабораторией Сокольского ЦСЭН 31.05.1994, в створе водозабора и ниже города Сокола у д. Кузнецово показывает, что качество вод реки Сухоны (в сущности это уже озёрные воды!) выше города Сокола по большинству показателей не выходит за пределы допустимых значений. Отмечается некоторое превышение по нефтепродуктам – 0,16 мг/л и свинцу – 0,04 мг/л. Река Сухона в пределах черты города Сокола испытывает нагрузку от сточных вод, поэтому отмечается увеличение концентрации нефтепродуктов до 0,32 мг/л, свинца – до 0,07 мг/л.

Выводы и рекомендации

1. Выполнен количественный анализ причин и следствий обратного течения в верховьях реки Сухоны во время весеннего половодья и вычислены многолетние гидрологические характеристики этого явления.

2. Оценена дальность проникновения вод реки Сухоны в озеро Кубенское, что даёт возможность оценить их влияние на качество водных ресурсов озера и воды, поступающей в район водозабора города Вологды. При обратном течении реки Сухоны во время весеннего половодья водные массы достигают начала подводящего канала водозабора, расположенного в 2 км от истока реки.

3. Факт движения вод реки Сухоны по протоке Большой Пучкас в сторону водозабора не установлен. Рекогносцировочное обследование в весенний период, опрос жителей свидетельствует о постоянном направлении стока Большого Пучкаса в реку Сухону.

4. Выполнена оценка характеристик твёрдого стока, поступающего в озеро во время обратного течения реки Сухоны.

5. Воды, проникающие в озеро со стороны реки Сухоны и достигающие места водозабора, характеризуются как загрязнённые и по своим гидрохимическим показателям не отвечают требованиям к озеру Кубенскому как водоёму высшей рыбохозяйственной категории.

6. По окончании обратного течения реки Сухоны показатели качества вод озера Кубенского возвращаются к исходным.

7. Для избежание попадания загрязнённых вод в водозабор города Вологды рекомендуется разработать соответствующий регламент работы водозаборных сооружений.

Литература	**References**
Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. 263 с.	Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle [Erosion and sediment runoff on Earth]*. Kazan': Publ. of Kazan University, 1984. 263 p. (In Russian).
Ильина Л.Л. Грахов А.Н. Реки Севера. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 128 с.	Il'ina L.L. Grakhov A.N. *Reki Severa [The rivers of the North]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1987. 128 p. (In Russian).

Ильинский Н.В. Вологодский край: Пособие с методическими послесловиями для школьных работников, учащихся старших групп педтехникума и девятилетки, а также для краеведов Ч. 1. Естественно-производительные силы. Вологда: Вологодск. губ. отд. нар. образ., 1928. 166 с.

Il'inskii N.V. *Vologodskii krai: Posobie s metodicheskimi poslesloviyami dlya shkol'nykh rabotnikov, uchashchikhsya starshikh grupp pedtekhnikuma i devyatiletki, a takzhe dlya kraevedov Chast' 1. Estestvenno-proizvoditel'nye sily [Vologda Territory: a manual. Part 1. Natural-productive forces].* Vologda: Publ. of Vologda provincial department of public education, 1928. 166 p. (In Russian).

Кириллова В.А. Характеристика притоков озера // Кубенское озеро: Материалы комплексных исследований / Отв. ред. Т.И. Малинина и И.М. Распопов. Л.: Наука, 1974. С. 9-11.

Kirillova V.A. Kharakteristika pritokov ozera. In T.I. Malinina and I.M. Raspopov (eds.) *Kubenskoe ozero: Materialy kompleksnykh issledovanii [Kubenskoye Lake: Materials of integrated research]* Leningrad, Publ. Nauka, 1974, pp. 9-11. (In Russian).

Озеро Кубенское: в 3 ч. Ч. 1. Гидрология / Отв. ред. Т.И. Малинина и И.М. Распопов. Л.: Наука, 1977. 306 с.

Ozero Kubenskoe: v 3 ch. Ch. 1. Gidrologiya [Lake Kubenskoe: in 3 parts. Part 1. Hydrology] Editors T.I. Malinina and I.M. Raspopov. Leningrad, Publ. Nauka, 1977. 306 p. (In Russian).

Ресурсы поверхностных вод: в 6 т. Т. 3. Северный край / Под ред. И.М. Жила и Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 663 с.

Resursy poverkhnostnykh vod: v 6 t. T. 3. Severnyi krai [Surface water resources: in 6 volumes. Vol. 3. The Northern Territory]. Editors I.M. Zhila and N.M. Alyushinskoi. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 663 p. (In Russian).

Филенко Р.А. Воды Вологодской области. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1966. 132 с.

Filenko R.A. *Vody Vologodskoi oblasti [Waters of the Vologda region]*. Leningrad: Publ. of the Leningrad University, 1966. 132 p. (In Russian).

УДК 556.535.5;556.168
DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.004

ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ЗИМНЕГО МАЛОВОДЬЯ РЕКИ НОРИЛКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

С.А. Журавин, М.Л. Марков

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

2014mml@gmail.com

Аннотация. Объектом исследования является р. Норилка (р. Норильская), расположенная на севере Красноярского края. Работа выполнена с использованием многолетних данных гидрометеорологических наблюдений на сети Росгидромета и «Таймырской гидрометеорологической экспедиции». В бассейне р. Норилки, как и в целом в регионе Таймыра, в период с октября 2012 по май 2013 года выпало всего 45% от нормы осадков, в результате чего сформировалось чрезвычайно низкое весеннее половодье. Питание больших озер, которые формируют сток реки, также было ограничено, поскольку в летний период установилась сухая жаркая погода. Это вызвало большую обеспокоенность в отношении водообеспеченности водозаборов крупнейшего в России горно-обогатительного комбината в городе Норильске в зимний период 2014 года. Возникшая ситуация потребовала решения комплекса гидрологических задач, основная из которых – разработка прогноза минимальных расходов воды на зимний период 2014 года. Прогноз разработан на основе

FORECASTING OF THE EXTREME WINTER LOW FLOW FOR THE NORILKA RIVER

Sergey A. Zhuravin, Mikhail L. Markov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

2014mml@gmail.com

Abstract. The object of the study is the Norilka River, located in the North of the Krasnoyarsk territory. Only 45% of the norm of precipitation fell in the basin of the Norilka River for the period from October 2012 to May 2013, that resulting in an extremely low spring flood formation. The feeding of the large lakes that form the river flow was also limited, as dry weather set in during the summer. This caused great concern regarding the water availability of water intakes of mining and processing plant in the city of Norilsk for the winter of 2014. The situation required the solution of a complex of hydrological tasks, the main of which is the development of a forecast of minimum water consumption for the winter of 2014. The forecast was developed using relationship between area pre-winter moistening with intensity of

Журавин С.А., Марков М.Л. Прогноз экстремального зимнего маловодья реки Норилки для обеспечения устойчивого водоснабжения // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 245-261. DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.004

анализа связи предзимнего увлажнения территории с интенсивностью снижения зимнего стока. Так как мощность ледяного покрова может существенно влиять в этом регионе на пропускную способность русел рек, то в прогнозе учтены прогнозируемые температуры воздуха зимы 2013-2014 годов. В результате расчетов установлено, что минимальный месячный сток в апреле составит 22 $м^3/с$, суточный – 20 $м^3/с$ при погрешности около ±5 $м^3/с$. Полученные результаты явились основой для проведения мероприятий, направленных на обеспечение устойчивого водоснабжения с потребностью в 7 $м^3/с$. Ниже водозаборов в августе-сентябре 2013 года была обустроена грунтовая перемычка, создавшая подпор на участке водозаборов. Фактический расход в апреле 2014 года составил около 14 $м^3/с$. При ширине реки почти 200 м, формировании на ней гряд и льда мощностью до 1,5-2 м этот расход воды мог не обеспечить приток в водозаборные ковши. Поэтому строительство перемычки было оправданным и перебоев водоснабжения комбината не произошло. Методические подходы, примененные к решению данной задачи, могут быть полезны при возникновении аналогичных ситуаций в северных регионах России.

Ключевые слова: север Красноярского края; экстремальное маловодье; ледовый режим; прогноз; зимний сток рек; устойчивое водоснабжение

the winter runoff depletion. Since the capacity of the ice cover can significantly affect to decrease of the river flow, the hydrological forecast takes into account the long-term air temperatures forecast for 2013-2014 winter period. It was obtained the forecast that the minimum monthly discharge for April would be at about 22 m^3/s, meanwhile daily discharge 20 m^3/s. The received results were a basis for carrying out the measures directed on maintenance of steady water supply with need discharge in 7 m^3/s. The low ground dam below water intakes was arranged at backwater on a site of water intakes for August-September 2013. The actual flow discharge for April 2014 was about 14 m^3/s. Therefore, the construction of the dam was justified and interruptions of water supply of the plant did not happen. The methodological approaches applied to the solution of this problem can be useful in case of similar situations in the Northern regions of Russia.

Keywords: North of Krasnoyarsk region; extreme low flow; ice regime; forecast; winter river flow; sustainable water supply

Zhuravin S.A., Markov M.L. Forecasting of the extreme winter low flow for the Norilka River. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 245-261 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.004

Введение

Зимняя межень часто является лимитирующим фактором для функционирования водохозяйственных комплексов. При их проектировании, согласно принятым нормативно-методическим документам, разрабатываются статистические прогнозы маловодий. Вместе с тем, для планирования водоснабжения остается актуальным, особенно в экстремально низкую водность, прогноз на конкретный срок. Такая острая потребность в прогнозе сложилась у ПАО «ГМК «Норильский никель» в зимний период 2013-2014 годов. В предшествующий период с октября 2012 по май 2013 года, по данным «Талнахской гидрометеорологической экспедиции», выпало всего 45% от нормы осадков, в результате чего сформировалось очень низкое весеннее половодье. Питание озер Мелкое, Лама, Кета, Глубокое и Собачье, которые формируют сток реки Норилки в течение теплого периода года, также было ограничено, поскольку в летний период установилась сухая жаркая погода. Наша экспертная оценка вероятного зимнего минимального суточного расхода воды 2014 года, основанная на ретроспективном анализе данных гидрологических наблюдений, показала, что его величина может колебаться в пределах 5-25 м^3/с. Был сделан предварительный вывод, что суточный меженный зимний расход в апреле 2014 года может достичь абсолютного минимума за период гидрологических наблюдений, которые проводятся на р. Норилке в створе п. Валек с 1937 года. Такой низкий сток не смог бы обеспечить нормальное функционирование предприятий Норильского промышленного района с минимальной потребностью водоснабжения из реки в 7 м^3/с. Поэтому было принято решение о проектировании и строительстве на реке Норилке временной заниженной перемычки, создающей подпор и небольшое водохранилище на участке водозаборов. Проектирование потребовало решения комплекса гидрологических задач, одна из которых была связана с более обоснованным прогнозом минимального стока в конце зимней межени (апрель-май). Этот прогноз был разработан в Государственном гидрологическом институте (ФГБУ «ГГИ»). Цель настоящей статьи – представить его методику, поскольку многолетние изменения климата повысили опасность возникновения подобных ситуаций в арктических регионах России [Climate Change, 2007; Анисимов, Жильцова, 2012] и опыт подобных прогнозов может быть востребован и в других случаях.

Объект исследований и исходная информация

Объектом исследований является р. Норилка (Норильская). Площадь водосбора р. Норилки в створе п. Валек составляет 19600 км^2. Большая его часть расположена в горах плато Путоран, имеющих высоты до 1200-1600 м и более. Эта часть водосбора характеризуется рядом отдельных поднятий, блоков и возвышенностей, расчлененных глубокими разломами, занятыми речными долинами и глубокими озерами (озеро Лама, в частности, имеет глубину более 200 м).

На северо-западе к горам Путорана примыкает тектоническая депрессия, называемая «Норильской долиной», по дну которой протекает р. Норилка. Всхолмленное дно этой депрессии сложено ледниковыми отложениями, высотные отметки колеблются от 50 м до 100 м, повышаясь к краям до 200 м и более. Для этой части водосбора типично распространение многочисленных небольших бессточных озер. В расширенной котловинообразной части депрессии расположено обширное оз. Мелкое с площадью водного зеркала 270 км^2.

Мощность многолетнемерзлых пород рассматриваемой территории составляет 200-400 м, глубина сезонно-талого слоя почво-грунтов колеблется от нескольких десятков сантиметров до 3-4 м. В районе равнины и на склонах гор имеется выход источников, некоторые из которых характеризуются высоким дебитом (до 100 л/с).

Часть поверхности долины и склоны примыкающих к ней гор покрыты редкостойным лиственничным лесом, который местами поднимается до отметок 500 м. Выше расположена мохово-лишайниковая тундра. Вершины возвышенностей и гор заняты гольцами.

Гидрографическая система бассейна р. Норилки представляет собой две системы озер. В первую из них входят озера непосредственно системы р. Норилки – Мелкое, Лама, Глубокое, Собачье и ряд более мелких озер, водосборы которых составляют около 70% бассейна реки. Сток из них через систему проток поступает в оз. Мелкое, из которого вытекает собственно р. Норилка. Вторая система включает озеро Кета и вытекающую из него р. Рыбную – основной левый приток р. Норилки. Таким образом, р. Норилка фактически является протокой от оз. Мелкое к оз. Пясина и ее сток, несмотря на то, что озера занимают только около 5% площади водосбора и являются слабо проточными, полностью зависит от озерного регулирования [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1973].

Исходной гидрологической информацией послужили материалы наблюдений за стоком и уровнем воды, ледовыми явлениями на гидрологическом посту, который расположен

в 2,3 км ниже п. Валек в 200 м ниже моста. Наблюдения проводились в период 1937-1982 гг., 1988-2005 гг., 2009 г.-по настоящее время.

Для анализа гидрометеорологической обстановки использованы данные наблюдений «Талнахской гидрометеорологической экспедиции» (ранее в составе системы Гидрометслужбы) за период 1933-38, 1949-58, 1962-1995, 2000-2013 годы.

Анализ исходной информации и методика прогноза

Анализ формирования стока воды р. Норилки показал, что определяющие объем весенне-летнего половодья и бассейновых запасов влаги осадки выпадают в период с октября по июль включительно. Именно эти осадки определяют в дальнейшем формирование зимней межени следующего года.

Сумма осадков за период с октября 2012 по июль 2013 года составила наименьшую за период наблюдений величину – 201 мм. Близкие по величине осадки за этот период наблюдались только в 1936-37 гидрологическом году и составили 204 мм. Всего случаев, когда за указанный период выпадали осадки суммой менее 300 мм, наблюдалось 10 из 58-и в ряду наблюдений, и все они сопровождались последующей низкой зимней меженью. При этом в двух случаях такие годы выпадали сериями по три года (1950-53 и 1982-85 годы).

Кривая обеспеченности суммы осадков за период X-VII (Таблица 1) показывает, что эта величина для 2013 года имеет исключительно редкую вероятность, равную примерно 97% вероятности превышения.

Таблица 1. Величины сумм осадков, формирующих основные бассейновые запасы влаги (X-VII), различной вероятностью превышения

Table 1. Precipitation sums forming the main basin moisture resources (X-VII) with different probability of exceeding

Р, %	1	5	10	50	75	80	90	95	98
Р, мм	503	464	442	357	308	295	260	230	196

$P_{ср}$ = 353 мм, C_v = 0,2, $C_{s/cv}$ = -1,5

Формирование стока воды рассматривается за гидрологический год, который, как было отмечено выше, продолжается с октября по сентябрь следующего года.

С начала октября в регионе практически всегда устанавливается отрицательная температура воздуха как на возвышенностях, так и на равнинных территориях. Питание рек

поверхностными осадками в это время прекращается, и режим стока воды определяется бассейновыми запасами влаги, которая была накоплена в озерах и горизонтах подземных вод.

Подземные воды в бассейне находятся в основном в твердой фазе, то есть в виде льда, ввиду большой глубины залегания многолетнемерзлых пород. Поэтому подземное питание рек осуществляется преимущественно в теплый период года из маломощных щебенистых горизонтов надмерзлотных вод и незначительно по величине. Питание гидрографической сети из более глубоких горизонтов осуществляется в зонах разрывных нарушений, особенно в таликовых зонах крупных глубоких водоемов. Однако такие зоны ограничены по площади и также не оказывают существенного влияния на режим меженного стока, обеспечивая, тем не менее, определенный минимум стока.

Основным источником питания р. Норилки в холодный период года являются запасы воды, накопленные в озерных системах. Эти запасы в течение зимы срабатываются по экспоненциальной кривой спада, нарушаемой ледовыми явлениями и процессами, вплоть до апреля, который является лимитирующим потребление воды месяцем. В апреле, с ослаблением морозов, сток стабилизируется на минимальных уровнях, а к концу месяца, как правило, начинается его медленный рост, хотя поверхностного притока воды в гидрографическую систему реки еще не происходит. В мае сток продолжает медленно повышаться и в конце месяца обычно начинается половодье.

Как было отмечено выше, основным источником питания р. Норилки в холодный период года, то есть с октября по апрель включительно являются воды, накопленные в озерных системах в течение всего теплого периода, прежде всего в период весенне-летнего половодья и налагающихся на него дождевых паводков июня-июля. За этот период в формировании стока участвует от 2/3 до 3/4 суммы годовых осадков. В случае выпадения значительных осадков в августе-сентябре могут формироваться довольно значительные дождевые паводки, которые, однако, быстро срабатываются в течение сентября – первой половины октября ввиду незначительной регулирующей емкости озерных систем и оказывают либо очень ограниченное влияние на зимний меженный сток, либо не оказывают его совсем.

Таким образом, величина предзимних бассейновых запасов воды характеризуется расходом воды в начале гидрологического года – октябре, когда срабатываются локальные повышения стока, вызванные сентябрьскими осадками. Измерения расходов воды в этот период затруднены и возможным предиктором бассейновых запасов может служить расход воды, измеренный в конце сентября (в случае отсутствия значительных осадков в сентябре), либо полученный по типовой спадовой кривой. Однако наилучшим вариантом представляется

все-таки установившийся расход воды после образования ледостава на реке и стабилизации шероховатости на его нижней поверхности.

Гидрометрические наблюдения на р. Норилке в створе п. Валек показывают, что для маловодных лет с последующей низкой зимней меженью расход воды на конец октября варьирует от года к году в пределах от 170 $м^3/с$ до 370 $м^3/с$, понижаясь в течение месяца до 100-300 $м^3/с$. Измеренный расход в створе 10,9 км выше автодорожного моста 30.09.2013 составил всего 187 $м^3/с$, то есть наименьшую за весь период наблюдений величину. В очень маловодные 1978 и 2004 годы расход воды на эту дату был примерно на 90 $м^3/с$ выше.

В дальнейшем в течение зимы происходит истощение бассейновых запасов воды. Кривые истощения, в случае выпадения незначительного количества осадков в сентябре, начинают достаточно отчетливо формироваться уже в этом месяце предыдущего гидрологического года. Небольшие отклонения возможны только при выпадении существенных осадков или локальных похолоданиях. Следует отметить, что часть осадков, выпадающих в это время на каменные осыпи, просачиваясь вглубь, замерзает и переходит в фазу гольцовых льдов.

В первой-второй декадах октября на реках и озерах начинает образовываться шуга, которая на реках увеличивает сопротивление потоку (шероховатость) и вызывает увеличение уровней воды при том же расходе воды.

Во второй половине октября формируется ледовый покров на реках и озерах. Толщина льда увеличивается в течение всей зимы вплоть до мая, ежегодно достигая на р. Норилке в стрежне русла в среднем 130-150 см. Наиболее интенсивный рост толщины льда наблюдается преимущественно в первые зимние месяцы – октябрь-декабрь. В дальнейшем рост толщины льда замедляется, а в отдельные годы в течение января-февраля его рост может даже приостанавливаться. При этом максимальная толщина льда не зависит напрямую от суммы отрицательных температур воздуха за холодный период, поскольку на ее формирование оказывают влияние высота снега на льду, величина стока воды, продолжительность и чередование периодов с очень низкими и относительно высокими температурами воздуха.

Самая большая максимальная толщина льда (186 см) наблюдалась на р. Норилке в конце зимы в 1969 году, когда сумма отрицательных средних месячных температур воздуха за период с ноября по март составила 184,4°C, хотя в 1966 году при близких величинах температур она составила всего 136 см. В 2011 году при самой теплой зиме (сумма температур составила -121,4°C) наблюдалась толщина льда 165 см. Следует отметить, что толщина льда

на р. Норилке является не вполне корректным показателем, поскольку основное воздействие льда на сток происходит на выходе рек из озер и на самих озерах.

Между тем, зимние температуры оказывают очевидное косвенное воздействие на формирование зимнего меженного стока [Гуревич 2009; Shrestha et. al., 2012; Schnorbus, Werner, Bennett, 2014]: первые холодные месяцы кривые истощения стока в основном следуют классической схеме. Однако в период с января по апрель они могут заметно отклоняться от классической кривой истощения (рисунок 1).

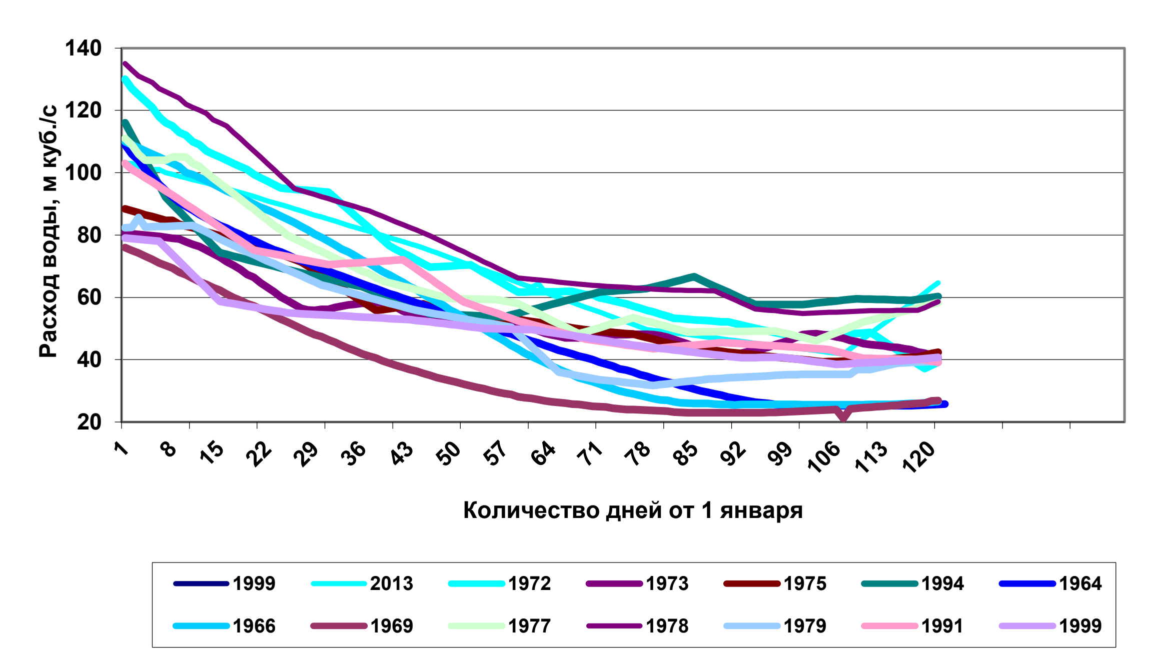


Рисунок 1. Кривые истощения стока р. Норилки за выборочные годы с наиболее низкой зимней меженью

Figure 1. Recession curves of the Norilka River for the selected years with the lowest winter base flow

Это происходит вследствие ряда причин: помимо прямого воздействия ледового покрова на сток в результате отъема воды на ледообразование и его косвенного влияния в результате изменения гидравлических характеристик потока, ледовый покров влияет на режим поступления в гидрографическую сеть подземных вод. Поэтому при долгосрочном прогнозе меженного зимнего стока необходимо вводить сценарную поправку на зимние условия, рассматривая возможность холодной, нормальной (средней по температурному режиму) и теплой зимы.

Зимний сток рек осуществляется преимущественно за счет их питания подземными водами. Для р. Норилки дополнительным источником питания являются воды озер, в которых

к концу теплого периода аккумулируется значительный объем воды. На гидрограф зимнего стока может оказывать влияние также ледяной покров, который изменяет дренирующую роль гидрографической сети за счет стеснения площади живого сечения потока подо льдом [Гуревич, 2009]. Снижение расхода воды зимой в реке по мере уменьшения подземного питания и сработки емкости озер достаточно точно описывается зависимостью, представляющей частный случай известных уравнений Майе-Буссинеска:

$$Q_i = Q_0 \exp(-at) \pm \Delta q \,, \tag{1}$$

где Q_i – расход воды на i-тый момент времени t;

Q_0 – начальный расход воды;

a – безразмерный параметр;

t – порядковый номер месяца от начала зимы;

Δq – изменение стока реки по отношению к средним зимним температурным условиям, связанное с изменением пропускной способности руслового потока при формировании ледяного покрова.

Уравнение (1) принято для разработки прогноза минимального зимнего стока зимы 2013-2014 годов р. Норилки.

По данным наблюдений на гидрологическом посту в д. Валек начиная с зимы 1939-1940 годов определены параметры уравнения (1) по средним месячным расходам воды в р. Норилке (таблица 2).

Начальный зимний расход воды Q_0 зависит от предшествующего увлажнения бассейна. Показателем предзимнего увлажнения принят средний месячный расход воды в реке в сентябре $Q_{ср9}$, с которым установлена связь Q_0 (рисунок 2).

Параметр интенсивности истощения стока, **a**, при неизменных гидрогеологических условиях связан с начальным расходом воды Q_0. Чем больше увлажненность бассейна и объем аккумулированной воды в озерах, тем интенсивнее идет их сработка в начальный период (рисунок 3).

Таблица 2. Параметры уравнения (1)

Table 2. Parameters of equation (1)

Год	***Q₀***	***a***	Год	***Q₀***	***a***
1940	1385	-0,474	1972	743	-0,368
1941	777	-0,472	1973	465	-0,336
1942	1333	-0,416	1974	1175	-0,428
1943	874	-0,374	1975	851	-0,425
1944	806	-0,333	1976	590	-0,347
1945	1256	-0,414	1977	768	-0,386
1946	741	-0,359	1978	653	-0,330
1947	749	-0,396	1979	427	-0,336
1948	958	-0,354	1980	511	-0,323
1949	671	-0,332	1981	713	-0,346
1950	756	-0,358	1982	533	-0,335
1951	691	-0,337	1989	1325	-0,347
1952	1077	-0,404	1990	1419	-0,452
1953	1200	-0,411	1991	655	-0,376
1954	1013	-0,369	1992	871	-0,358
1955	1086	-0,39	1993	807	-0,358
1956	586	-0,361	1994	588	-0,336
1957	450	-0,326	1995	865	-0,343
1958	539	-0,336	1996	825	-0,371
1959	637	-0,375	1997	426	-0,274
1960	450	-0,351	1998	653	-0,350
1962	819	-0,392	1999	497	-0,357
1963	778	-0,389	2000	705	-0,342
1964	769,9	-0,431	2001	776	-0,380
1965	1184	-0,434	2003	781	-0,397
1966	791	-0,439	2004	976	-0,362
1967	900	-0,382	2005	470	-0,285
1968	910	-0,338	2009	563	-0,288
1969	1004	-0,52	2010	1020	-0,342
1970	573	-0,339	2011	859	-0,359
1971	627	-0,374	2012	834	-0,283

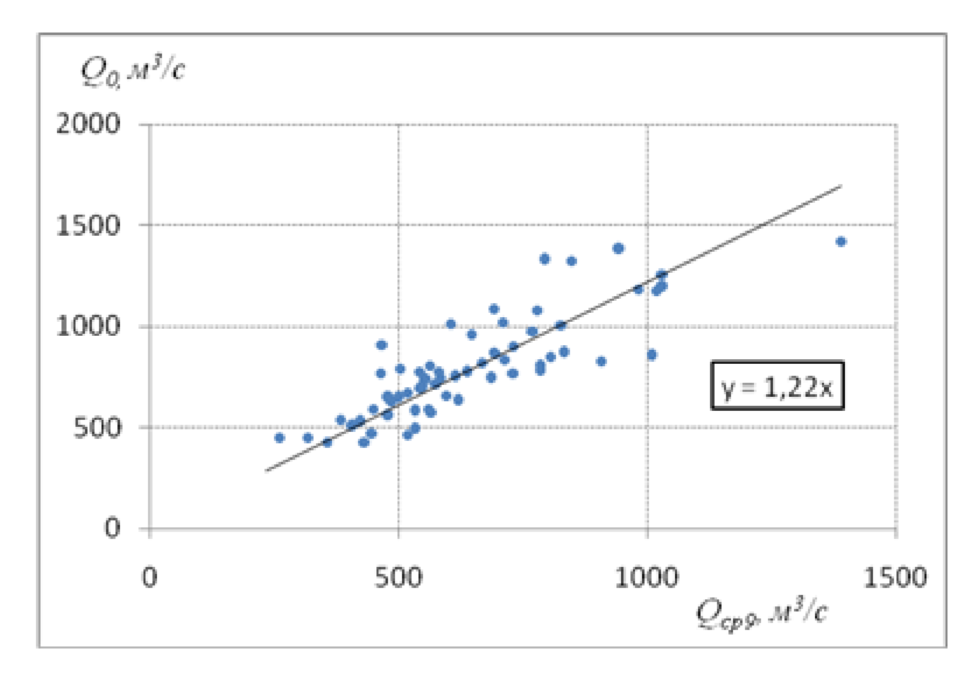


Рисунок 2. Связь начального расхода зимы Q_0 со средним месячным расходом воды в р. Норилке в сентябре $Q_{ср9}$

Figure 2. Relationship between the initial winter discharge $\mathbf{Q_0}$ and the mean monthly discharge for September $\mathbf{Q_{av9}}$ at the Norilka River

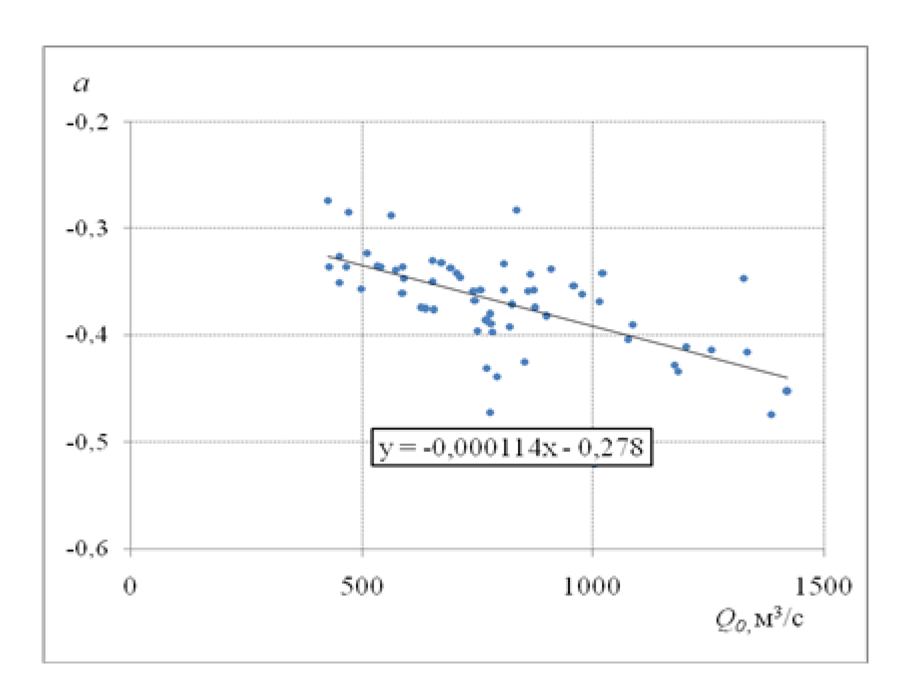


Рисунок 3. Связь коэффициента истощения стока, ***a***, с начальным зимним расходом воды Q_0

Figure 3. Relationship of the flow depletion coefficient **a** and initial winter discharge $\mathbf{Q_0}$

Оценить влияние ледяного покрова на гидрограф зимнего стока не представляется возможным из-за невысокой точности определения толщины льда, как в гидрометрическом створе, так и при переносе этой характеристики на весь ледовый режим по гидрографической

сети. Поэтому изменение минимального зимнего стока, связанное с суровостью зимы, оценено по связи с суммой средних месячных температур воздуха за ноябрь-март (рисунок 4). Температура воздуха взята по метеостанции Таймырского филиала. Учитывая, что интенсивный рост льда наблюдается в первые месяцы (50-70% максимальной толщины), приняты следующие весовые коэффициенты при расчете суммы отрицательных температур воздуха:



$$\Sigma(T)=1{,}5T_{ноябрь}+2T_{декабрь}+T_{январь}+T_{февраль} \quad (2)$$

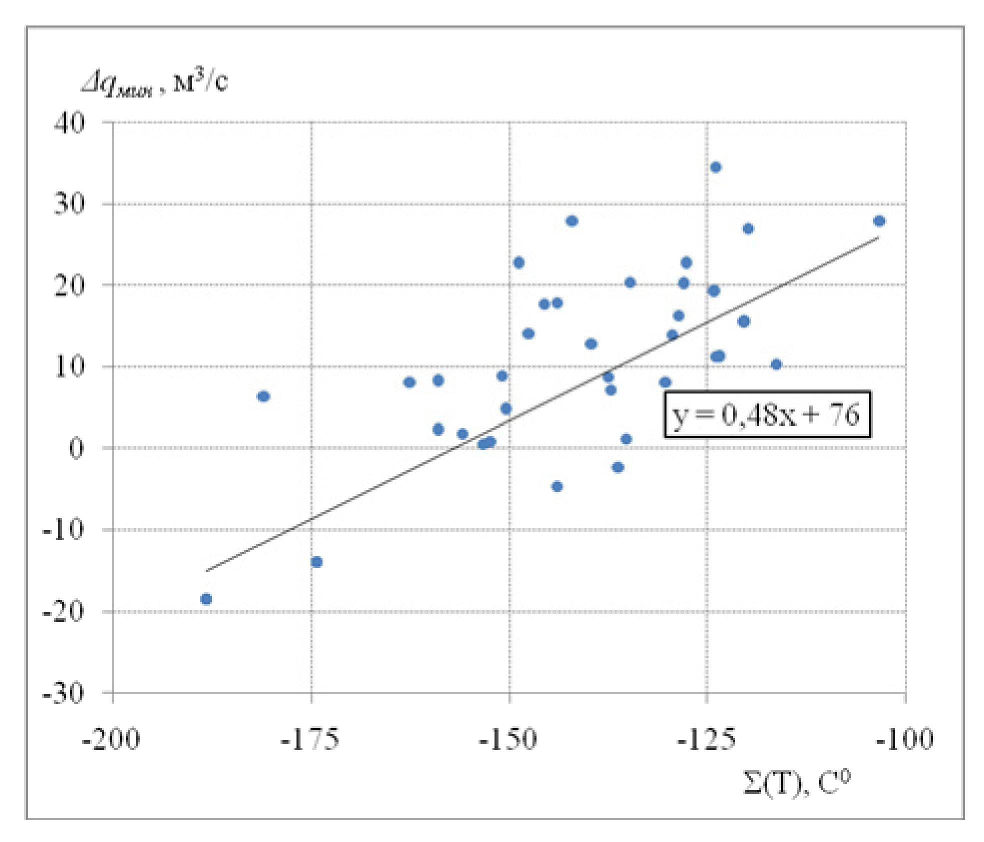


Рисунок 4. Связь изменения минимального зимнего 30-ти суточного стока $\Delta q_{мин}$ с суммой отрицательных температур воздуха за октябрь-март Σ(T)

Figure 4. Relationship of minimum 30 days discharge changes for the Norilka River Δq_{min} and sum of monthly air temperature for October-March Σ(T)

Прогноз минимального апрельского расхода воды в р. Норилке был осуществлен по уравнению (1) с учетом уравнений, приведенных на рисунках 2-3.

Средний месячный сток в сентябре в р. Норилке по данным Талнахской гидрометеорологической экспедиции составляет $Q_{ср9}$ = 207 м³/с. В соответствии с уравнением на рисунке 2 Q_0 составил 252 м³/с.

По прогнозу Гидрометцентра России с вероятностью до 70% предстоящая зима (2013-2014 годов) в районе г. Норильска ожидалась около климатической нормы. При этом следует отметить, что возможности сезонного прогноза весьма ограничены. Его оправдываемость за последние 15 лет не превышала 58-81%. Из-за невысокой оправдываемости долгосрочного прогноза температуры воздуха прогноз стока был разработан для двух сценариев климатической ситуации зимой: среднего и наиболее критичного, то есть холодного по температуре воздуха.

Если зима по температурному режиму близка к средним многолетним значениям, то «ледовую» составляющую можно не учитывать и принять коэффициент истощения стока, **а**, по уравнению, приведенному на рисунке 3, равным -0,307. Таким образом, минимальный средний месячный сток в реке Норилке в условиях «средней» по температуре воздуха зимы в апреле по прогнозу должен был составить 22 $м^3/с$.

Если ожидалась холодная зима, то сумма температур воздуха должна была составить -175 C^0 (при вероятности превышения 5%), а средний месячный апрельский расход, в соответствии с приведенным на рисунке 4 графиком связи, мог достигнуть величины 14 $м^3/с$, что, в конечном итоге и оправдалось.

Для определения минимального суточного расхода воды была установлена связь, приведенная на рисунке 5. В соответствии с приведенным на этом рисунке уравнением минимальный суточный сток в р. Норилке составит в холодную зиму 13 $м^3/с$, в среднюю – 20 $м^3/с$. Такой расход воды, распределенный по ширине реки с движением в русле микроформ-гряд и мезоформ-ленточных гряд зимой может не обеспечить необходимый приток воды к двум водозаборам по обе стороны реки.

По данным многолетних гидрологических наблюдений определены расчётные значения минимального месячного и суточного стока р. Норилки (таблица 3). В соответствии с этими данными ожидался минимальный сток в среднюю по температуре зиму, близкий по величине к 97%, а в холодную зиму – и 99,5% обеспеченности. Поэтому необходимость принятия решения АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания» совместно с ГМК «Норильский никель» о строительстве дорогостоящей перемычки на реке (рисунок 6) была обоснована гидрологическими условиями.

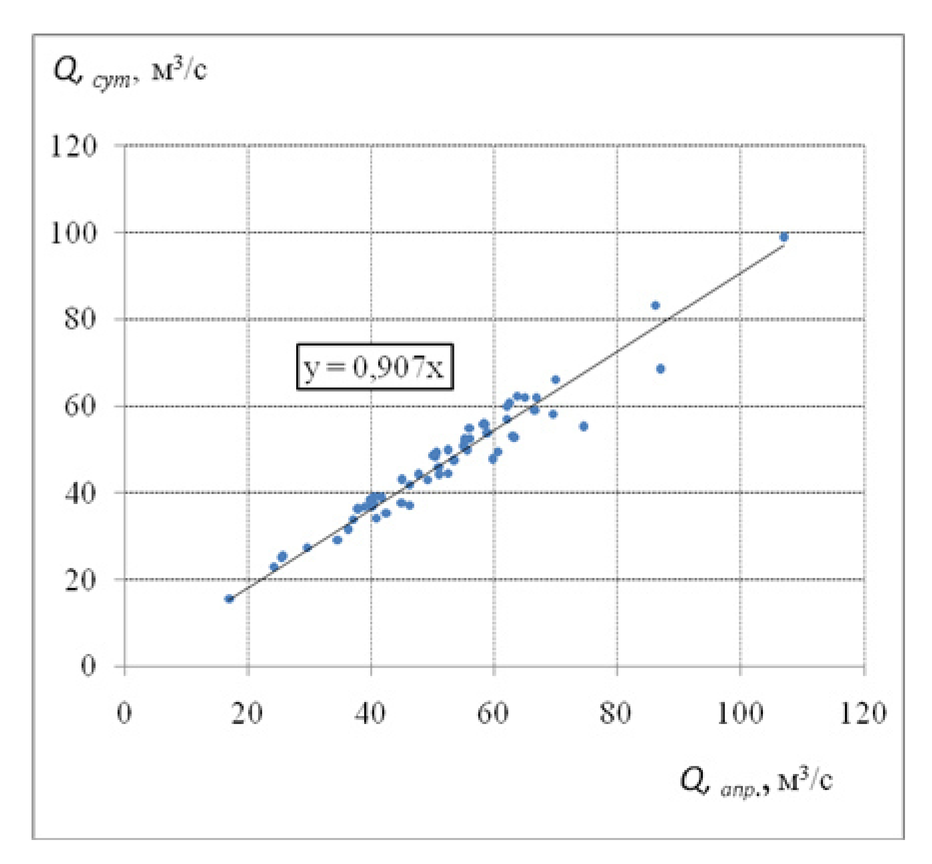


Рисунок 5. Связь минимального суточного расхода воды $Q_{сут}$ р. Норилки с минимальным средним месячным расходом $Q_{апр}$

Figure 5. The relationship of the minimum daily water flow rate of the Norilka river with the minimum average monthly flow rate of APR

Таблица 3. Параметры кривой распределения вероятностей превышения минимального месячного и суточного стока р. Норилки

Table 3. Parameters of the probability distribution curve for exceeding the minimum monthly and daily flow of the Norilka River

Характеристика	Средн.	C_v	C_s/C_v	Вероятность превышения, %								
				5	10	50	75	80	90	95	98	99
Мин. 30-сут. расход, м³/с	50,1	0,26	-1,5	70,0	66,2	51,0	41,8	39,3	32,7	27,1	20,5	15,9
Мин. суточный. расход, м³/с	45,0	0,24	-3,0	60,4	58,0	46,4	38,6	36,4	30,4	25,1	18,7	13,9



Рисунок 6. Общий вид русловой перемычки на р. Норилке

Figure 6. General view of the dam on the Norilka River

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что 2013 год являлся уникальным по метеорологическим условиям. Количество осадков, формирующих зимний сток 2013-2014 годов, составило около 57% нормы и имело исключительно редкую вероятность, равную 97% вероятности превышения.

Низкая обеспеченность осадками бассейна р. Норилки привела к высокой вероятности снижения стока в конце зимы до 13-20 м^3/с (97-99% вероятности превышения). Наименьшие значения минимального суточного стока прогнозировались в случае, если температура воздуха в холодный период будет ниже средней многолетней. По прогнозам Гидрометцентра ожидалось с вероятностью до 70% (при оправдываемости прогнозов 60-80%), что зима будет близкой к климатическим нормам. В этом случае минимальный месячный сток в апреле должен был по прогнозу составить 22 м^3/с, суточный – 20 м^3/с. Учитывая неопределенность в метеорологическом прогнозе, погрешность расчета минимального стока принята ориентировочно ±5 м^3/с. Фактический расход в апреле 2014 года составил около 14 м^3/с. При ширине реки почти 200 м, формировании на ней гряд и льда мощностью до 1,5-2 м этот расход воды мог не обеспечить приток в водозаборные ковши. Поэтому строительство перемычки было оправданным и необходимым для повышения уровня и создания требуемого ресурса воды на период экстремально низкого стока.

Для увеличения точности прогнозов и оптимального управления водным режимом р. Норилки в перспективе целесообразно расширить сеть пунктов гидрометеорологических наблюдений. Особенно это касается режима озер и определения снегозапасов на конец зимы в горной части бассейна р. Норилки. Эти вопросы могут быть решены, в том числе с использованием дистанционных методов зондирования земли современными космическими спутниками.

Литература

Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений // Метеорология и Гидрология. 2012. № 6. С. 95-107.

Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. №9. С. 92-99.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Том 16. Ангаро-Енисейский район. Выпуск 1. Енисей. / Отв. ред. А.П. Муранов. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 724 с.

Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Solomon S., Qin D., Manning M. (eds.). Cambridge New York: Cambridge University Press, 2007. 1008 p.

References

Anisimov O.A., Zhil'tsova E.L. Climate change estimates for the regions of Russia in the 20th century and in the beginning of the 21st century based on the observational data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, t. 37, no. 6, pp. 421-429. (Russ. ed.: Anisimov O.A., Zhil'tsova E.L. Ob otsenkakh izmenenii klimata regionov Rossii v dvadtsatom veke i nachale dvadtsat' pervogo veka po dannym nablyudenii. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2012, no. 6, pp. 95-107). DOI: 10.3103/S1068373912060106

Gurevich E.V. Influence of air temperature on the river runoff in winter (the Aldan river catchment case study). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, t. 34, no. 9, pp. 628-633. (Russ. ed.: Gurevich E.V. Vliyanie temperatury vozdukha na zimnii stok rek (na primere basseina reki Aldan). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, no. 9, pp. 92-99). DOI: 10.3103/S1068373909090088

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 tomakh. Tom 16. Angaro-Eniseiskii raion. Vypusk 1. Enisei. [*Surface water resources of the USSR*: in 20 volumes. Volume 16. Angara-Yenisei region. Issue 1. Yenisei]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1973. 724 p. (In Russian)

Schnorbus M., Werner A., Bennett K. Impacts of climate change in three hydrologic regimes in British Columbia, Canada // Hydrological Processes. 2014. Volume 28, Issue 3. P. 1170-1189. DOI: 10.1002/hyp.9661.

Shrestha R.R., Schnorbus M.A., Werner A.T., Berland A.J. Modelling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fraser River basin, British Columbia, Canada // Hydrological Processes. 2012. Volume 26, Issue 12. P. 1840-1860 DOI: 10.1002/hyp.9283

Schnorbus M., Werner A., Bennett K. Impacts of climate change in three hydrologic regimes in British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, 2014, vol. 28, iss. 3, pp. 1170-1189. DOI: 10.1002/hyp.9661.

Shrestha R.R., Schnorbus M.A., Werner A.T., Berland A.J. Modelling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fraser River basin, British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, 2012, vol. 26, iss. 12, pp. 1840-1860 DOI: 10.1002/hyp.9283

Solomon S., Qin D., Manning M. (eds.) *Climate Change 2007*: The Physical Science Basis. Cambridge New York, Cambridge University Press, 2007. 1008 p.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS

УДК 556.01

DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.005

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА Т. КАРМАНА

А.Ю. Виноградов[1,2], М.М. Кадацкая[1]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. В статье рассмотрены различные подходы к оценке физической сущности параметра Т. Кармана, характеризующего распределение скорости потока по вертикали. С одной стороны, параметр Т. Кармана является коэффициентом пропорциональности между длиной пути перемешивания и глубиной, с другой – характеризует угол наклона вертикального профиля скорости. Считается, что данный параметр является универсальным, то есть константой при условии, что осредненное распределение скоростей является постоянным. Однако, в зависимости от того, каким образом мы определяем величину данного параметра, различие в его значениях доходят до 2 порядков.

Рассмотрены два способа оценки параметра Т. Кармана. В первом случае параметр

THEORETICAL CALCULATION OF THE VALUE OF THE VON KARMAN CONSTANT

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Mariya M. Kadatskaya[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. The article considers various approaches to assessing the physical essence of the von Karman constant characterizing the vertical distribution of the flow velocity. On the one hand, the von Karman constant is a proportionality coefficient between the length of the mixing length and the depth; on the other hand, it characterizes the tilt angle of the vertical velocity profile. It is considered that this parameter is universal, that means it is constant as long as the averaged velocity distribution is constant. However, depending on estimation way of this constant, its values under the same conditions may differ to 2 orders.

Two methods for estimating the von Karman constant are considered. In the first

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M. Theoretical calculation of the value of the von Karman constant. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 262-279 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.005

определяется на основе прямых измерений максимальной и средней скоростей движения потока, глубины и уклона водной поверхности на конкретном участке. Распространение полученного значения на другие створы приведет к ошибкам.

Во втором случае параметр определяется как функция коэффициента гидравлического трения. Авторами показано, что параметр Т. Кармана является функцией коэффициента турбулентного обмена (вязкости) и опосредованно является функцией глубины потока. В результате расчетов показано, что в придонной части значения параметра Т. Кармана максимальны.

Дополнительно в статье предложен новый вариант расчета параметра Т. Кармана через величину касательного напряжения для турбулентного потока.

Сделан вывод, что поскольку для скоростей <1 м/с при изменении значений параметра Т. Кармана от 0,27 до 0,38 изменения максимальной скорости не превышают 3%, что укладывается в погрешность измерений скорости вертушкой, то практически оценить величину параметра Т. Кармана на основании измеренных скоростей для равнинных рек даже при множественных измерениях стандартным гидрометрическим оборудованием невозможно.

Ключевые слова: параметр Кармана; коэффициент турбулентного обмена (вязкости);

case, determination of the von Karman constant is on the grounds of direct measurements of the maximum and average flow velocities, depth and slope of the water surface in a particular area. Propagation of the obtained value to other objects will lead to errors.

In the second case, the parameter is defined as a function of the coefficient of hydraulic friction. The authors showed that the von Karman constant is a function of the coefficient of turbulent exchange (viscosity) and indirectly is a function of the depth. As a result of the calculations, it was shown that the maximum values of the von Karman constant observed on the bottom.

Additionally, the authors propose a new version of the calculation of the von Karman constant through the tension shift for a turbulent flow.

It is concluded that since for velocities <1 meter per second the changes in the von Karman constant values from 0.27 to 0.38 the maximum velocity with variation do not exceed 3%, which fits into the accuracy of the velocity measurements, it is practically impossible to estimate the value of von Karman constant by first method for flat rivers even with multiple measurements with standard hydrometric equipment.

Keywords: the von Karman constant; coefficient of turbulent exchange (viscosity);

число Рейнольдса; коэффициент гидравлического трения; эпюра распределения скоростей; турбулентный режим

Reynolds number; coefficient of hydraulic friction; velocity distribution diagram; turbulent mode

Введение

Объектом исследования данной работы является параметр Т. Кармана, характеризующий распределение скорости потока по вертикали.

Гипотеза о локальном кинематическом подобии поля турбулентных пульсаций скоростей, предложенная в 1930 году Т. Карманом, позволяет во всех случаях установить связь между длиной *l* и осредненным полем скорости. Согласно данной теории, поля турбулентных пульсаций в окрестности каждой точки развитого турбулентного течения (за исключением точек пограничного слоя) подобны друг другу и отличаются лишь масштабами длины и времени (или длины и скорости) [Монин, Яглом, 1965].

Длина пути перемешивания *l* является одним из масштабов подобия и согласно теории Т. Кармана, функцией ординаты *y* [Шлихтинг, 1974]. Характер зависимости $l = f(y)$ в общем виде принят равным [Барышников, Попов, 1988]

$$l = \kappa \cdot y^m \tag{1}$$

где κ – параметр Т. Кармана,

m – параметр, обычно принимается численно равным 1 [Гришанин, 1969; Дейли, Харлеман, 1971].

Определения объекта исследования

В литературных источниках встречаются различные определения и соответствующие формулы для оценки параметра Т. Кармана. Ниже приведены некоторые из них:

Параметр Т. Кармана (постоянная Прандтля-Кармана) есть величина, обратная относительному дефициту средней скорости на вертикали, нормированному по динамической скорости [Железняков, 1981]:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{V_{\max} - V}{V_*} \tag{2}$$

Параметр Т. Кармана представляет собой универсальную безразмерную величину, одинаковую для всех турбулентных течений при условии, что осредненное распределение скоростей этих течений является постоянным [Шлихтинг, 1974].

Параметр Т. Кармана – безразмерная величина, которая является мерой турбулентности в потоке жидкости [Hall, 2000]:

$$\kappa = \sqrt{\frac{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}{3V^2}}$$

Параметр Т. Кармана является характеристикой осредненного профиля скоростей. Под интегральным параметром Т. Кармана понимается опытная величина, характеризующая в универсальных координатах угол наклона профиля скорости, постоянный по основной толще турбулентного ядра потока. Его значение не зависит от формы потока и шероховатости стенок [Скребков, Федоров, 2013].

Параметр Т. Кармана является важной составной частью современных теорий турбулентности, которым можно характеризовать зону развитой турбулентности. Это обстоятельство указывает на возможную фундаментальную роль этой константы в теории турбулентности[1].

Численные значения объекта исследования

Касательно численного значения параметра Т. Кармана в литературе также нет единого мнения. Одни авторы утверждают, что численное значение данного параметра может быть определено только из опыта [Шлихтинг, 1974]. Некоторые исследователи значительные расхождения в значениях данного параметра объясняют погрешностями определения динамической скорости [Гольдштик, Кутателадзе, 1969; Скребков, Федоров, 2013].

Другие специалисты считают его не постоянным, а зависящим от числе *Re* и меняющимся в пределах живого сечения [Штеренлихт, 1984], например, для труб предлагается следующая формула для оценки параметра Т. Кармана [Большаков, Константинов, Попов, 1977]:

$$\kappa = 0{,}337 / d^{0.08} \tag{3}$$

[1] Сабденов К.О., Ерзада М. Постоянная Кармана – фундаментальная? [Электронный ресурс] URL: http://www.enu.kz/ru/info/novosti-enu/29405/ (дата обращения: 15.07.2019)

где d – диаметр трубы.

Гришанин считает, что параметр Т. Кармана слабо меняется с изменением числа *Re*. Влияние числа Рейнольдса на параметр Т. Кармана в естественных потоках было отмечено Г.В. Железняковым [Гришанин, 1969]. Другие авторы [Гольдштик, Кутателадзе, 1969] отмечают, что при достаточно больших числах Рейнольдса значение параметра Т. Кармана становится постоянным.

С увеличением концентрации наносов и воздуха в жидкости снижается сопротивление движению и, следовательно, уменьшаются численные значения коэффициента гидравлического трения λ и параметра κ [Штеренлихт, 1984]. Это объясняется тем, что поскольку указанные параметры связаны с коэффициентом Шези C обратной зависимостью, то κ должно убывать под влиянием плотностных течений [Железняков, 1981]. Расчет параметра Т. Кармана при учете наносов предлагается проводить по следующей эмпирической зависимости:

$$\kappa = 0{,}385\frac{1+\rho_{мв}\dfrac{\rho_н-\rho}{\rho}}{1+2{,}5\rho_{мд}}, \tag{4}$$

где $\rho_н$ – плотность наносов;

ρ – плотность воды;

$\rho_{мв}$ – средняя на вертикали относительная (объемная) концентрация наносов;

$\rho_{мд}$ –относительная (объемная) концентрация наносов у дна.

Отдельного обсуждения заслуживает диапазон изменения параметра Т. Кармана κ по различным литературным источникам:

Так, Железняков пишет, что κ убывает от 1,2 до 0,2 с возрастанием коэффициента Шези C или же возрастает с увеличением коэффициента Дарси λ [Железняков, 1981]. Уменьшение турбулентности движения потока вызывает уменьшение параметра Т. Кармана.

Дж. Дейли и Д. Харлеман в своем труде отмечают, что для внутренней области пограничного слоя параметр Т. Кармана κ=0,41, для внешней κ=0,267 [Дейли, Харлеман, 1971].

В общем случае, чем больше отношение средней скорости потока к динамической, тем меньше параметр Т. Кармана [Гришанин, 1969].

Если распределение скоростей по вертикали соответствует логарифмическому закону, то получаемые опытным путем значения параметра Т. Кармана оказываются меняющимися в широких пределах. По опытным данным Н.Н. Павловского на прямолинейных участках русла со спокойным рельефом дна, где течение близко к равномерному, κ изменяется от 0,309 до 0,428. Параметр Т. Кармана обычно принимается равным 0,4 для турбулентных потоков в трубах [Штеренлихт, 1984], хотя имеются данные, по которым следовало бы уменьшить это значение [Монин, Яглом, 1965].

По данным опытов И.И. Никурадзе, приведенным в [Гришанин, 1969], величина параметра Т. Кармана лежит в диапазоне 2,9-3,2.

Для равномерного турбулентного течения при отсутствии шероховатого трения параметр Т. Кармана принимается равным 0,333 [Монин, Яглом, 1965]. В опытах Б.Л. Кириллова параметр Т. Кармана изменялся в диапазоне 0,07-0,16, у Джилла – в диапазоне 0,1-0,4 [Одишария, Точигин, 1998], у Дейли, Харлемана составлял 0,267 [Дейли, Харлеман, 1971].

Таким образом, различия в величине столь важного параметра, характеризующего распределение скорости потока по вертикали, у различных исследователей доходят до двух порядков.

Рассмотрим основные способы оценки данного параметра.

Оценка значения κ на основании измеренных значений скоростей потока

Относительный недостаток местной скорости на вертикали [Гришанин, 1969; Железняков, 1976] есть функция относительной глубины:

$$\frac{V_{\max} - V}{V_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{y} . \quad (5)$$

Эта зависимость основана на теории переноса количества движения [Железняков, 1976].

Из приведенной зависимости выразим искомый параметр:

$$\kappa = \frac{\ln \frac{h}{y} V_*}{V_{\max} - V} \quad (5^*)$$

В случае, когда средняя скорость на вертикали измерена $V(y=0{,}4h)=V_{cp}$, зависимость принимает следующий вид:

$$\kappa = -\frac{\ln 0{,}4 \cdot V_*}{V_{\max} - V_{0,4}} \tag{5**}$$

Примечательно, что зависимость (5**) преобразуется в $\kappa = \frac{V_*}{V_{\max} - V}$ при отношении *y/h* = 0,37, что соответствует выводам Гришанина о глубине, на которой согласно логарифмической функции фиксируется средняя скорость [Гришанин, 1969], то есть последний вид зависимости более точен.

Для оценки максимальной скорости можно воспользоваться следующими зависимостями:

В.Н. Гончарова [Барышников, Попов, 1988]:

$$V_{\max} = V_{cp} \frac{\lg(16{,}7\frac{y}{\Delta}+1)}{\lg 6{,}15\frac{h}{\Delta}}; \tag{6}$$

Х.Э. Базена [Железняков, 1976]:

$$V_{\max} = V_{cp} - \frac{MV_*}{3\sqrt{g}}, \tag{7}$$

параболической формулой Х.Э. Базена [Барышников, Попов, 1988]:

$$V_{\max} = V_{cp} - \frac{MV}{C}\left(1-\frac{y}{h}\right)^2 \tag{8}$$

эллиптической формулой А.В. Караушева:

$$V_{\max} = V_{cp}\sqrt{1-\left(0{,}57+\frac{3{,}3}{C}\right)\left(1-\frac{y}{h}\right)^2} \tag{9}$$

а также зависимостями, в которых присутствует параметр Т. Кармана:

Л. Прандтля [Шлихтинг, 1974]:

$$V_{\max} = \frac{V_*}{\kappa}\ln\frac{h}{y} + V_{cp} \tag{10}$$

Т. Кармана [Шлихтинг, 1974]:

$$V_{\max} = -\frac{V_*}{\kappa}\left(\ln(1-\sqrt{\frac{y}{h}}) + \sqrt{\frac{y}{h}}\right) + V_{cp}; \qquad (11)$$

[Железняков, 1976]:

$$V_{\max} = -\frac{V_*}{\kappa}\left(\ln(1-\sqrt{1-\frac{y}{h}}) + \sqrt{1-\frac{y}{h}}\right) + V_{cp} \qquad (12)$$

$$V_{\max} = \frac{V_*}{\kappa}\left(\ln\left(\frac{(1+\sqrt{1-\frac{y}{h}})}{1-\sqrt{1-\frac{y}{h}}}\right) - 2\sqrt{1-\frac{y}{h}}\right) + V_{cp} \qquad (13)$$

$$V_{\max} = \frac{\sqrt{2}V_*}{\kappa}\left(\arcsin\sqrt{1-\frac{y}{h}} - \sqrt{\frac{y}{h}}\sqrt{1-\frac{y}{h}}\right) + V_{cp} \qquad (14)$$

$$V_{\max} = \frac{V_*}{\kappa}\ln\frac{1+\frac{\Delta}{30h}}{\frac{y}{h}+\frac{\Delta}{30h}} + V_{cp} \qquad (15)$$

$$V_{\max} = -\frac{V_*}{\kappa}\ln\frac{y}{h} + V_{cp} \qquad (16)$$

$$V_{\max} = -\frac{V}{\frac{\kappa C}{\sqrt{g}(1+\frac{\kappa C}{\sqrt{g}})}} \qquad (17)$$

где V_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с: $V_* = \sqrt{ghi}$;

V_{cp} – средняя скорость потока, м/с, на глубине y =0,4h;

Δ – высота выступов шероховатости, м;

h – глубина потока, м;

M – размерный коэффициент, значение которого составляет 20-24 м^{0,5}/с [Железняков, 1976; Барышников, Попов, 1988], по А.В. Караушеву данный параметр зависит от коэффициента Шези [Железняков, 1976];

С – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Поскольку опытные значения параметров κ для плоского и пространственного потоков различны [Железняков, 1976], то для упрощения задачи считаем поток плоским

равномерным, тогда безразмерный коэффициент Шези $C_* = C/\sqrt{g}$ для каждой вертикали считаем равным таковому для пространственной задачи, то есть для всего потока. В рамках данной статьи принято, что донные отложения представляют собой несвязные грунты с размером частиц d=1 мм, соответственно $\Delta = 2/3d = 0{,}00067$ м и $C_* = 27{,}8$, глубина потока составляет 5 м (за исключением специально оговоренных случаев).

Расчет максимальных скоростей по рассмотренным зависимостям приведен в таблице 1.

Таблица 1. Максимальная скорость потока на вертикали, рассчитанная по различным зависимостям

Table 1. Maximum vertical flow velocity that calculated from various dependencies

$V_{ср}$, м/с	0,1	0,5	1	2
V_*, м/с	0,004	0,019	0,038	0,077
i, б/р	0,0000003	0,0000075	0,0000302	0,0001206
V_{max}, (6), м/с	0,11	0,55	1,09	2,19
V_{max}, (7), м/с	0,11	0,55	1,10	2,20
V_{max}, (8), м/с	0,11	0,55	1,10	2,20
V_{max}, (9), м/с	0,11	0,57	1,13	2,26
κ (5*)	0,33	0,32	0,32	0,32
V_{max}, (10), м/с	0,11	0,55	1,11	2,23
V_{max}, (11), м/с	0,11	0,52	1,05	2,10
V_{max}, (12), м/с	0,11	0,54	1,09	2,18
V_{max}, (13), м/с	0,11	0,53	1,07	2,13
V_{max}, (14), м/с	0,11	0,53	1,07	2,14
V_{max}, (15), м/с	0,11	0,55	1,12	2,24
V_{max}, (16), м/с	0,11	0,55	1,12	2,24
V_{max}, (17), м/с	0,11	0,56	1,12	2,24

Среднее значение κ, исходя из рассчитанной максимальной скорости потока на вертикали по формулам 6-9: 0,32.

Исходя из зависимости [Монин, Яглом, 1965]

$$\frac{V}{V_*} = -\frac{2,3}{\kappa} \lg \frac{y}{h} \tag{18}$$

для нашего случая параметр Т. Кармана на высоте выступов шероховатостей равен 0,34.

Зависимости, кроме первых четырех, имеют в качестве аргумента уже известное значение параметра Т. Кармана, что не позволяет их использовать в первичных расчетах для оценки последнего. Сравнение полученных осредненных значений максимальной скорости по формулам (10)-(17) дает наилучшее совпадение с таковой, полученной по формулам (6)-(9) при значении κ=0,30.

Уточним значение параметра Т. Кармана по формуле Г.В. Железнякова:

$$\kappa = \frac{\kappa_{max} - \kappa_{min}}{1 + C/\sqrt{g}} + \kappa_{min} \tag{19}$$

Или по формуле [Железняков, 1976; Гидротехнические сооружения, 1983]

$$\kappa = \frac{2\sqrt{\lambda}}{\sqrt{g} + \sqrt{\lambda}} + 0,3 \tag{20}$$

$$\kappa = \frac{\kappa_{max}\sqrt{i} + \kappa_{min}\sqrt{Fr}}{\sqrt{i} + \sqrt{Fr}}, \tag{21}$$

где $Fr = \frac{V^2}{gh}$ – число Фруда на вертикали.

По данным литературных источников разброс численных значений параметра Т. Кармана варьируется в следующих пределах:

[Железняков, 1976] $\kappa_{min} = 0,3; \quad \kappa_{max} = 2,3$;

[Барышников, Попов, 1988] $\kappa_{min} = 0,26; \quad \kappa_{max} = 0,54$;

[Одишария, Точигин, 1998] $\kappa_{min} = 0,1; \quad \kappa_{max} = 0,4$.

Таким образом, максимальный разброс по различным литературным данным составляет $\kappa_{min} = 0,1; \quad \kappa_{max} = 2,3$.

Исходя из таблицы 2 можно сделать вывод, что зависимости, приведенные в [Железняков, 1976; Гидротехнические сооружения, 1983], могут быть использованы только для оценки параметра Т. Кармана на основе серии измерений на конкретном участке.

Таблица 2. Оценка величины параметра Т. Кармана по различным литературным источникам
Table 2. The estimate of von Karman constant on various sources

данные \ зависимость	(19)	(20)	(21)
$\kappa_{\min} = 0{,}3; \quad \kappa_{\max} = 2{,}3$ [Железняков, 1976]	0,37	0,33	0,37
$\kappa_{\min} = 0{,}26; \quad \kappa_{\max} = 0{,}54$ [Барышников, Попов, 1988]	0,27	0,29	0,27
$\kappa_{\min} = 0{,}1; \quad \kappa_{\max} = 0{,}4$ [Одишария, Точигин, 1998]	0,11	0,13	0,11
Обобщенные данные $\kappa_{\min} = 0{,}1; \quad \kappa_{\max} = 2{,}3$	0,15	0,10	0,15

Оценка значения κ на основании сопротивлений движению потока воды

Поскольку коэффициент гидравлического сопротивления связан с распределением скоростей в потоке [Jiménez et al., 2010], то вполне естественно предположить его функциональную связь с коэффициентом турбулентного обмена и параметром Т. Кармана.

Коэффициент турбулентного обмена (вязкости) A на глубине y в различных литературных источниках предлагается оценивать по следующим формулам:

[Барышников, Попов, 1988; Гришанин, 1969]

$$A = \kappa \cdot V_* y\rho \tag{22}$$

[Лаптев, Фарахов, 2012]

$$A = \kappa \cdot V_{cp} \cdot y\rho\sqrt{\frac{\lambda}{2}} \tag{23}$$

[Лаптев, Фарахов, 2012]

$$A = 3{,}75 \cdot V_{cp} \cdot y\rho\lambda \tag{24}$$

Коэффициенты при зависимостях (23) и (24) пересчитаны для случая движения плоского равномерного потока в [Виноградов и др., 2019].

$$A = \frac{15 \cdot V_*^4 \rho \cdot y}{V_{cp}{}^3 \lambda} \tag{25}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

ρ – плотность жидкости, 1000 кг/м^3.

При сравнении формул (23) и (24) получаем:

$$A = \kappa \cdot V \cdot y\rho\sqrt{\lambda / 2} = 3{,}75 \cdot V \cdot y\rho\lambda$$
$$\kappa\sqrt{\lambda / 2} = 3{,}75\lambda$$

Отсюда $\lambda = \frac{1}{2}\left(\frac{\kappa}{3{,}75}\right)^2 = 0{,}03556\kappa^2$, следовательно

$$\kappa = \sqrt{\frac{\lambda}{0{,}03556}} \tag{26}$$

Из зависимостей (22) и (24): $A = \kappa \cdot V_* \cdot y\rho = 3{,}75 \cdot V \cdot y\rho\lambda$

$$\kappa = \frac{3{,}75V\lambda}{V_*} \tag{27}$$

И, наконец, из формул (22) и (25) получаем $A = \kappa \cdot V_* \cdot y\rho = \frac{15 \cdot V_*^4 \cdot y\rho}{V^3 \lambda}$

$$\kappa = \frac{15V_*^3}{V^3 \lambda} \tag{28}$$

Для расчета λ использовалась формула А.П. Згежды, как дающая осредненное значение коэффициента гидравлического трения [Виноградов и др., 2019]:

$$\lambda = \frac{1}{(4\lg\frac{h}{\Delta} + 4{,}25)^2} \tag{29}$$

Проведем сравнительные расчеты коэффициента гидравлического трения при принятых t =10^{0}С, μ =0,0013 кг/м·с; ν =0,0000013 м^2/с [2] [Гришанин, 1969]. Результаты расчетов коэффициента гидравлического трения λ представлены в таблице 3.

Таблица 3. Расчет величины параметра Т. Кармана для несвязных грунтов по формулам (26)-(31)
Table 3. Calculation of von Karman's constant for incoherent soils by formulas (26) - (31)

d, мм	2	1	0,5	0,2	0,1
λ	0,0029	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018
$\kappa(26)$	0,29	0,27	0,25	0,24	0,22
$\kappa(27)$	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18
$\kappa(28)$	0,21	0,24	0,27	0,31	0,34
$\tau\ \frac{кг}{м \cdot c^2}$	0,36	0,32	0,28	0,25	0,22
$\kappa(31)$	0,27	0,29	0,30	0,33	0,34

Второй вариант расчета параметра Т. Кармана [Гришанин, 1969]:

$$\frac{dV_y}{dy} = \frac{1}{\kappa}\frac{V_*}{y} \tag{30}$$

$$\frac{dV_y}{dy} = \frac{\tau}{\mu} \qquad\qquad \frac{\tau}{\mu} = \frac{1}{\kappa}\frac{V_*}{y} \Rightarrow$$

$$\kappa = \frac{\mu \cdot V_*}{y \cdot \tau} \tag{31}$$

где V_y – скорость потока на глубине y.

Величина касательного напряжения для турбулентного потока τ , оценивалась по зависимости [Барышников, Попов, 1988]:

$$\tau \approx \rho\lambda \frac{V_y^2}{2} \tag{32}$$

---
[2] Методические рекомендации по расчету местного размыва у опор мостов. 2-е изд. М.: Союздорнии, 1988.

Как видно из таблицы 4 параметр Т. Кармана меняется от 0,26 до 0,32 в зависимости от применяемого подхода и используемой формулы.

Таблица 4. Расчет параметра Т. Кармана по различным подходам

Table 4. Calculation of von Karman's constant by various approaches

зависимость	5*	5**	26	27	28	31	среднее
значение κ	0,32	0,30	0,27	0,26	0,30	0,29	0,28

Изменения значений параметра Т. Кармана κ по глубине, исходя из зависимостей (5*), (28) и (30) продемонстрированы в таблице 5. Для расчета приняты следующее значения: динамическая скорость $V_* = 0{,}019$ м/с; средняя скорость потока на глубине y=0,4h V_{cp}=0,53 м/с; максимальная скорость потока $V_{\max}$ =0,577 м/с, скорость потока на высоте выступов шероховатости принята равной 0,163 м/с.

Среднее значение κ по зависимости (5*), исходя из данных таблицы 5, равно 0,32, что близко к значению, полученному из измерения скоростей.

Таблица 5. Изменение параметра Т. Кармана в зависимости от глубины потока

Table 5. Change of von Karman constant depending on the depth of the stream

y	V	κ(5*)	κ(28)	κ(31)
0,00067	0,163	0,409	9,137	9,110
0,5	0,469	0,404	0,384	0,384
2	0,533	0,394	0,261	0,262
2,5	0,543	0,389	0,247	0,247
4	0,565	0,349	0,219	0,220
4,9995	0,575	0,001	0,208	0,208
Среднее		0,324	0,264* (1,74)	0,264* (1,74)

* Расчетное значение параметра Т. Кармана на границе выступов шероховатости из расчета среднего исключено.

Обоснование исключения из рассмотрения значение параметра Т. Кармана на границе выступов шероховатости. Данный подход связан с тем, что при $y \to \delta$, режим приближается к ламинарному и κ становится большим 1. Данный тезис можно проиллюстрировать, например, проведя расчет значения κ по формуле (10), результаты которого представлены в таблице 6.

Таблица 6. Расчетные значения параметра Т. Кармана на высоте верхней границы пограничного слоя

Table 6. The calculated values of von Karman constant at the upper of the boundary layer

V_{cp}, м/с	0,1	0,5	1	2
V_*, м/с	0,004	0,019	0,038	0,077
y, м	0,001287	0,000257	0,000129	0,000064
V_{max}, (15), м/с	0,11	0,55	1,12	2,24
κ (10)	3,31	3,41	3,35	3,61

Выводы

1. Считается, что параметр Т. Кармана является фундаментальным в широком смысле слова[3]; или, как минимум, универсальным и не зависящим от числа Рейнольдса [Akinlade, Bergstrom, 2007]. Нами, на основании изложенного подхода в разделе 2 показано, что κ является функцией коэффициента турбулентного обмена (вязкости) *A*. Исходя из формул (22-25), параметр *A* описывается линейной зависимостью по глубине *y*. Следовательно, параметр Т. Кармана опосредованно является функцией от глубины потока.

2. Результаты расчетов по зависимостям (28) и (31) практически идентичны. Исходя из данных [Дейли, Харлеман, 1971], в придонной части значения параметра Т. Кармана максимальны.

3. Изменения значений максимальной скорости при варьировании $0{,}27 \le \kappa \le 0{,}38$ по формулам (5-12) не превышают 3% для скоростей потока <1 м/с, что укладывается в погрешность измерений скорости вертушкой. Следовательно, практически оценить значение параметра Т. Кармана для равнинных рек даже при множественных измерениях стандартным гидрометрическим оборудованием невозможно.

Литература

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 454 с.

References

Akinlade O.G., Bergstrom D.J. Effect of surface roughness on the coefficients of a power law for the mean velocity in a turbulent boundary layer. *Journal*

[3] Сабденов К.О., Ерзада М. Постоянная Кармана – фундаментальная? [Электронный ресурс] URL: http://www.enu.kz/ru/info/novosti-enu/29405/ (дата обращения: 15.07.2019)

Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н. Справочник по гидравлике. К.: Вища школа, 1977. 280 с.

Виноградов А.Ю., Кадацкая М.М., Бирман А.Р., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бачериков И.В., Коваленко Т.В., Хвалев С.В., Парфенов Е.А. Расчёт неразмывающих скоростей водного потока на высоте верхней границы пограничного слоя // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 3. С. 44-61. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4782

Гольдштик М.А., Кутателадзе С.С. Вычисление константы пристенной турбулентности // Доклады академии наук СССР. 1969. Т. 185. № 3. С. 535-537.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 428 с.

Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости / Пер. с англ. под ред. О.Ф. Васильева. М.: Энергия, 1971. 480 с.

Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 308 с.

Железняков Г.В. Теория гидрометрии / 2-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 344 с.

of Turbulence. 2007. V. 8. Art. N18. DOI: 10.1080/14685240701317245

Baryshnikov N.B., Popov I.V. *Dinamika ruslovykh potokov i ruslovye protsessy [The dynamics of channel flows and channel processes]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1988. 454 p. (In Russian).

Bol'shakov V.A., Konstantinov Yu.M., Popov V.N. *Spravochnik po gidravlike [Handbook of hydraulics]*. Kiev, Publ. Vishcha shkola, 1977. 280 p. (In Russian).

Daily J.W., Harleman D.R.F. *Fluid dynamics*. Addison Wesley, Reading, Mass., 454 p. (Russ. ed.: Deili Dzh., Kharleman D. *Mekhanika zhidkosti.* Moscow, Publ. Energiya, 1971. 480 p.)

Gidrotekhnicheskie sooruzheniya [Waterworks]. Moscow, Publ. Stroiizdat, 1983. 543 p. (In Russian).

Gol'dshtik M.A., Kutateladze S.S. Vychislenie konstanty pristennoi turbulentnosti [Calculation of the constant wall turbulence]. *Doklady akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1969, t. 185, no 3, pp. 535-537. (In Russian).

Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1969. 428 p. (In Russian).

Hall C.W. *Laws and Models: Science, Engineering and Technology*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 535 p.

Jiménez J., Hoyas S., Simens M.P., Mizuno Y. Turbulent boundary layers and channels at moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010. V. 657. P. 335-360. DOI: 10.1017/S0022112010001370

Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Математические модели и расчет гидродинамических характеристик пограничного слоя [Электронный ресурс] // Научный журнал КубГАУ. 2012. №82(08). URL: http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/52.pdf (дата обращения: 13.04.2019)

Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика: в 2 т. Т. 1. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. 639 с.

Гидротехнические сооружения / Под общ. ред. В.П. Недрига. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.

Одишария Г.Э., Точигин А.А. Прикладная гидродинамика газожидкостных смесей. М.: Всерос. НИИ природ. газов и газовых технологий; Иваново: Иванов. гос. энергет. ун-т, 1998. 397 с.

Скребков Г.П., Федоров Н.А. Интегральная и локальная величины коэффициентов турбулентного профиля скорости // Вестник МГСУ. 2013. №4. С. 201-208. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.4.201-208

Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. с нем. Г.А. Вольперта; под ред. Л.Г. Лойцянского. М.: Наука, 1974. 713 с.

Laptev A.G., Farakhov T.M. Matematicheskie modeli i raschet gidrodinamicheskikh kharakteristik pogranichnogo sloya [Mathematical models and calculation of the hydrodynamic characteristics of a boundary layer]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU [Scientific Journal of KubSAU]*, 2012, iss. 82, pp. 704-738. Available at: http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/52.pdf. (In Russian; abstract in English).

Monin A.S., Yaglom A.M. *Statisticheskaya gidromekhanika: v 2 t. T. 1. Mekhanika turbulentnosti [Statistical fluid mechanics: in 2 vol. Vol. 1. The mechanics of turbulence]*. Moscow, Publ. Nauka, 1965. 639 p. (In Russian).

Odishariya G.E., Tochigin A.A. *Prikladnaya gidrodinamika gazozhidkostnykh smesei [Applied hydrodynamics of gas-liquid mixtures]*. Moscow: Publ. VNIIGAZ, 1998. 398 p. (In Russian)

Schlichting H. *Grenzschicht-Theorie*. Karlsruhe, G. Braun Verlag, 1965. 736 p. (Russ. ed.: Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya*. Moscow, Publ. Nauka, 1974. 713 p.)

Shterenlikht D.V. *Gidravlika: uchebnik dlya vuzov [Hydraulics: a textbook for high schools]*. Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1984. 640 p.

Skrebkov G.P., Fedorov N.A. Integral'naya i lokal'naya velichiny koeffitsientov turbulentnogo profilya skorosti [Local and integral values of coefficients of the turbulent velocity profile]. *Vestnik MGSU*, 2013, vol. 8, iss. 4, pp. 201-208. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.22227/1997-0935.2013.4.201-208.

Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

Akinlade O.G., Bergstrom D.J. Effect of surface roughness on the coefficients of a power law for the mean velocity in a turbulent boundary layer // Journal of Turbulence. 2007. V. 8. Art. N18. DOI: 10.1080/14685240701317245

Hall C.W. Laws and Models: Science, Engineering and Technology. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 535 p.

Jiménez J., Hoyas S., Simens M.P., Mizuno Y. Turbulent boundary layers and channels at moderate Reynolds numbers // Journal of Fluid Mechanics. 2010. V. 657. P. 335-360. DOI: 10.1017/S0022112010001370

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M., Birman A.R., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V., Khvalev S.V., Parfenov E.A. Raschet nerazmyvayushchikh skorostei vodnogo potoka na vysote verkhnei granitsy pogranichnogo sloya [Calculation of non-eroding water flow velocities at the height of the upper boundary layer]. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 44-61. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.15393/j2.art.2019.4782.

Zheleznyakov G.V. *Propusknaya sposobnost' rusel kanalov i rek [Bandwidth of channels of channels and rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1981. 308 p. (In Russian).

Zheleznyakov G.V. *Teoriya gidrometrii [Theory of Hydrometry]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1976. 344 p. (In Russian).

УДК 556 DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.006

РАСЧЕТ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОРАНА И МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ПРИ ПРОРЫВАХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Т.А. Виноградова[1], М.А. Макушин[1], И.А. Виноградов[2], Е.А. Парфенов[2], М.М. Кадацкая[2], С.И. Сазонова[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Петербург, г. Валдай, Россия

mk@npogtp.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросу расчета размеров прорана в грунтовых плотинах при переливе воды из водохранилища через гребень и максимального расхода волны прорыва.

Были проанализированы методы расчета, прописанные в нормативных документах и рекомендованные контролирующими органами. Выполнен расчет морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов прорывной волны различными методами для конкретных объектов, сравнение с экспертными оценками этих параметров. Отмечено,

CALCULATION OF THE MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CLOSURE CHANNEL AND THE EXTREME DISCHARGE DURING BREAKTHROUGHS OF GROUND DAMS

Tatiana A. Vinogradova[1], Miron A. Makushin[1], Ivan A. Vinogradov[2], Evgeni A. Parfenov[2], Mariya M. Kadatskaya[2], Svetlana I. Sazonova[2]

[1]St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; [2]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, St. Petersburg, Valday, Russia

mk@npogtp.ru

Abstract. The work is devoted to the calculation of the size of the closure channel in the ground dams when water is poured from the water reservoir through peak and the extreme discharge of the dam break wave.

The authors analyzed the methods of calculation prescribed in regulations and recommended by regulatory authorities. The calculation was made of the morphometric characteristics of the closure channel and extreme discharge of the dam break wave by various methods for specific objects, the comparison with expert estimates of these parameters. It is noted that the method, described in two

Vinogradova T.A., Makushin M.A., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kadatskaya M.M., Sazonova S.I. Calculation of the morphometric characteristics of the closure channel and the extreme discharge during breakthroughs of ground dams. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 280-295 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.006

что изложенная в двух нормативных документах методика, не имеет под собой физического обоснования, поскольку полученные размеры прорана и параметры волны прорыва не зависят от первоначального объема воды в водохранилище. В свою очередь расчетная схема другого нормативного документа не учитывает такой фактор, как время размыва и результат расчета отличается в разы при различном заданном шаге глубины размыва. Для данного документа характерно использование эмпирических соотношений, которые имеют довольно узкий диапазон использования, а также недоучет связи между формированием прорана и величиной сброса воды.

Из-за недостаточной обоснованности рекомендованных методик и больших несоответствий с экспертными оценками возникает необходимость создания новых альтернативных методов расчета. В данной статье рассмотрено 2 таких метода, разработанных в различных организациях. Первый метод косвенно учитывает материал плотины через расчет неразмывающей скорости. В основе второго метода лежит физический процесс размыва, что выгодно отличает его от других.

В качестве проверки расчетных значений были использованы данные о нескольких произошедших в последнее время катастрофических прорывах грунтовых плотин. Результаты сравнения позволяют сделать вывод о том, что

regulations, has no physical justification, because according to it the size of closure channel and the parameters of breakthrough wave do not depend on the initial volume of water in the reservoir. The calculation method in the third regulation, does not take into account such factor as the time of erosion and the results are different at times with different specified step of erosion depth. This regulation is characterized by the use of empirical relations, which have a rather narrow range of use, and a lack of account of the relationship between the formation of the closure channel and the value of water discharge.

Due to the lack of validity of the recommended calculation methods and large variation with expert estimates prescribed in the regulations, there is a need to create new alternative methods of calculation. This article discusses 2 such methods developed in various organizations. The first of them indirectly takes into account the material of the dam through calculated non-eroding velocity. The second one is based on the physical process of erosion, that is distinguishe it from others.

As a test of the calculated values, there were used data on several recent catastrophic breakthroughs of groundwater dams.

альтернативные методы дают большую точность.
На основе вышесказанного можно сделать предварительный вывод о необходимости пересмотра существующих нормативных документов.

Ключевые слова: прорывы грунтовых плотин; проран в грунтовой плотине; волна прорыва; максимальный расход прорывной волны; интенсивность размыва; безопасность гидротехнических сооружений

The comparison results allow us to conclude that alternative methods give greater accuracy.
Based on the previous, can be done a preliminary conclusion about the need to revise existing regulations.

Keywords: breakthroughs of ground dams; closure channel in the ground dam; dam break wave; the extreme discharge of the dam break wave; erosion rate; safety of water works facilities

Введение

Водохранилища, подпруженные грунтовыми плотинами, имеют широкое распространение по всему миру, так как их строительство обходится сравнительно недорого. Например, в лесостепной и степной зонах России, Украины и Казахстана на каждую малую реку было сооружено от 2 до 10 водохранилищ на каждые 100 км^2 водосборной площади. Однако, большинство таких плотин, построенных в 1940-1970 годах, в настоящее время находятся в аварийном состоянии. Этот факт является причиной масштабных катастрофических наводнений в результате прорыва паводковых вод через гребень плотины.

Одной из основных особенностей перелива через грунтовую плотину является формирования прорана – промоины при прорыве водным потоком напорного гидротехнического сооружения, например дамбы или земляной плотины. Формирование и увеличение размеров прорана влечет за собой сброс воды из водохранилища и его последующее опорожнение.

Цель данной работы – дать оценку существующим методам расчета характеристик прорана и максимальных расходов при прорыве грунтовой плотины. В рамках поставленной цели были определены следующие задачи:

- расчет морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов прорывной волны по выбранным методикам для конкретных объектов;

Vinogradova T.A., Makushin M.A., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Sazonova S.I., Kadatskaya M.M. Calculation of the morphometric characteristics of the closure channel and the extreme discharge during breakthroughs of ground dams *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 281-296 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.006

- оценка результатов расчетов по различным методикам в сравнении с экспертными оценками реальных случаев прорыва водохранилищ при размывах грунтовых плотин;
- в качестве возможного варианта расчета прорыва грунтовых плотин рассмотрены альтернативные подходы, в том числе основанные на описании физических принципов процесса размыва.

Вопрос расчета прорыва грунтовых плотин – довольно сложный и требующий учета большого числа различных факторов. Кроме объемов воды в водохранилище на момент прорыва и величины напора необходимо учитывать водно-физические и прочностные характеристики грунта плотины на момент размыва.

Параметры потока – в первую очередь скорость – будут оказывать влияние на интенсивность размыва тела плотины и увеличение прорана, что в свою очередь приведет к дальнейшему возрастанию скорости истечения через него.

Применяемые методики

В Российской Федерации для расчета параметров прорана и прорывной волны рекомендуются следующие нормативные документы: МР-81[1]; ПМП-91[2]; РД 03-607-03[3]. Следует отметить, что методики расчета, представленные в соответствующих разделах ПМП-91 и МР-81, не имеет различий.

Выбор именно этих регламентирующих документов в данной работе обусловлен рядом причин. Во-первых, отсутствует анализ применимости рекомендуемых расчетных методик, используемых в России. Во-вторых, сравнение рассчитанных и экспертных оценок значений параметров прорана и прорывной волны для различных объектов позволит оценить сильные и слабые стороны применяемых методик.

Кроме того, существует ряд научных работ, в которых рассматриваются альтернативные подходы к расчету прорыва грунтовых плотин, например [Пономарчук, 2011].

---

[1] Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин. М.: ВНИИТС, 1981. 17 с. (далее – МР-81).

[2] Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки. М.: Трансстрой, 1992. 180 с. (далее – ПМП-91).

[3] РД 03-607-03 Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов / Серия 03. Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Вып.42. М.: ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность", 2003. 17 с. (далее – РД 03-607-03)

Расчет изменения объема воды в водохранилище при прорыве в них, равно как и в РД 03-607-03, проводится по уравнению водного баланса:

$$W_i = W_{i-1} - \int_{t_{i-1}}^{t_i} (Q_{излив} - Q_{приток})dt \,, \quad (1)$$

где Wi – объем воды в водохранилища на i-ом шаге расчета, м^3;

$Q_{приток}$, $Q_{излив}$ – соответственно расходы притока и излива, м^3/с.

Максимальный расход воды в створе плотины при ее прорыве согласно п. 4 МР-81 и п. 8.3 ПМП-91 рассчитывается по формуле:

$$Q = KBH^{3/2} = bH^{3/2}, \quad (2)$$

где B – длина плотины по урезу воды в верхнем бьефе при предельном наполнении водохранилища, м;

H – напор воды (разница отметок воды верхнего и нижнего бьефа до прорыва плотины), м;

K – коэффициент, учитывающий отношение возможной ширины прорана к длине плотины B, расчетное значение определяется согласно таблице 8.1 ПМП-91;

$b = KB$ – расчетная ширина прорана, м.

Расчетный расход воды в створе плотины при расчете по методике РД 03-607-03:

$$Q_i = mb_i h_i^{3/2} \sqrt{2g} \,, \quad (3)$$

где b_i – ширина прорана на i-ом шаге, м;

h_i – глубина слоя воды, проходящего через проран, м;

m – коэффициент водослива, принят равным 0,31;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2.

Численное значение принятого выше коэффициента водослива m определяет следующие параметры прорана: прямоугольный водослив с широким порогом и нескругленным входным горизонтальным ребром и боковым сжатием $\varepsilon = 0{,}95$. Глубина потока на пороге водослива определена по способу Беланже [Чугаев, 1982].

Приращение ширины прорана:

$$b_i = b_{i-1} + \Delta y \frac{b_0}{y_0 + \Delta y} \qquad (4)$$

За начальные условия расчета размыва элементарного прорана принимается равенство $y_0 = b_0 = h_0 = 0{,}5$ м. Приращение глубины прорана на каждом расчетном шаге задается постоянным и равным $\Delta y \le y_0$.

Объекты и результаты расчетов

В качестве объектов исследования были выбраны три водохранилища, на которых происходили катастрофические прорывы, связанные с переливом через грунтовую плотину (таблица 1).

Таблица 1. Данные по рассматриваемым объектам [Бобков и др., 1999; Катастрофы конца XX века, 2001; Малик, 2009; Фролов, Волосухин, 2012]

Table 1. Data of considered objects by different literary sources

Водохрани-лище	Год	Страна	Объем водохра-нилища, млн. м^3	Площадь зеркала, млн. м^2	Высота плотины, м	Длина по гребню, м
Кокпектинское	2014	Казах-стан	2,7	0,4	11	940
Тирлянское	1994	Россия	7,0	1,293	9,85	400
Киселевское	1993	Россия	37,0	200	18	1920

В связи с неполнотой информации о конкретных объектах, для непосредственных расчетов был принят ряд допущений:

- Предельная глубина прорана, который образовывался в ходе размыва в каждом из случаев, принята равной высоте плотины.
- Заложение внутреннего и внешнего откосов дамбы для каждого водохранилища задавалось одинаковым: m =1:3.
- Грунт тела плотин определен как суглинки, средневзвешенный размер частиц – 0,00005 м.

Данные по Кокпектинскому водохранилищу и плотине предоставлены А.Ю. Виноградовым, обследовавшим их после прорыва в 2014 году (рисунок 1). Данные по Тирлянскому водохранилищу и Киселевской плотине взяты из [Фролов, Волосухин, 2012].



Рисунок 1. Проран в Кокпектинской земляной плотине. Катастрофа 30-31.03.2014. Фото Виноградова А.Ю.

Figure 1. Breach in the Kokpekty earthen dam. Accident of March 30-31, 2014. Photo by Alexey Yu. Vinogradov

Данные по Тирлянскому водохранилищу. Различие в оцененных объемах аккумулированной в водохранилище воды (4,96 млн. м^3 [Фролов, Волосухин, 2012] и 7,0 млн. м^3 [Малик, 2009]) на период катастрофы видимо соответствует объему при различном наполнении водохранилища при уровнях верхнего бьефа, доходящих до гребня плотины. Объем в 8,6 млн. м^3 [Бобков и др., 1999] с учетом притока воды – до 0,5 млн. м^3 (120 м^3/с в течение 75 минут сброса воды при прорыве) вероятно, несколько завышен. Ширина прорана, образовавшегося в результате катастрофы 7 августа 1994 года, так же оценивается авторами по-разному: от 20 до 80 м [Фролов, Волосухин, 2012].

Данные по Киселевской плотине. Разрушение Киселевской грунтовой плотины (р. Каква, Свердловская область) произошло из-за недостаточной водопропускной способности водосбросов, рассчитанных на пропуск паводка повторяемостью 1 раз в 1000 лет, равного 560 м^3/с [Фролов, Волосухин, 2012]. Приток в водохранилище по «фактическим» замерам в 7 часов 30 минут 14.06.1993 достиг 1000 м^3/с [Фролов, Волосухин, 2012], то есть превысил предельно допустимый почти в 2 раза. Водохранилище было переполнено и около полудня произошел прорыв дамбы (рисунки 2, 3).



Рисунок 2. Прорыв грунтовой плотины Киселевского водохранилища. 14.06.1993. Фото В. Суворина. Источник: https://uraloved.ru/istoriya/navodnenie-na-reke-kakva

Figure 2. Breach of the earthen dam of the Kiselevsky reservoir. 06/14/1993. Photo by V. Suvorin. URL: https://uraloved.ru/istoriya/navodnenie-na-reke-kakva

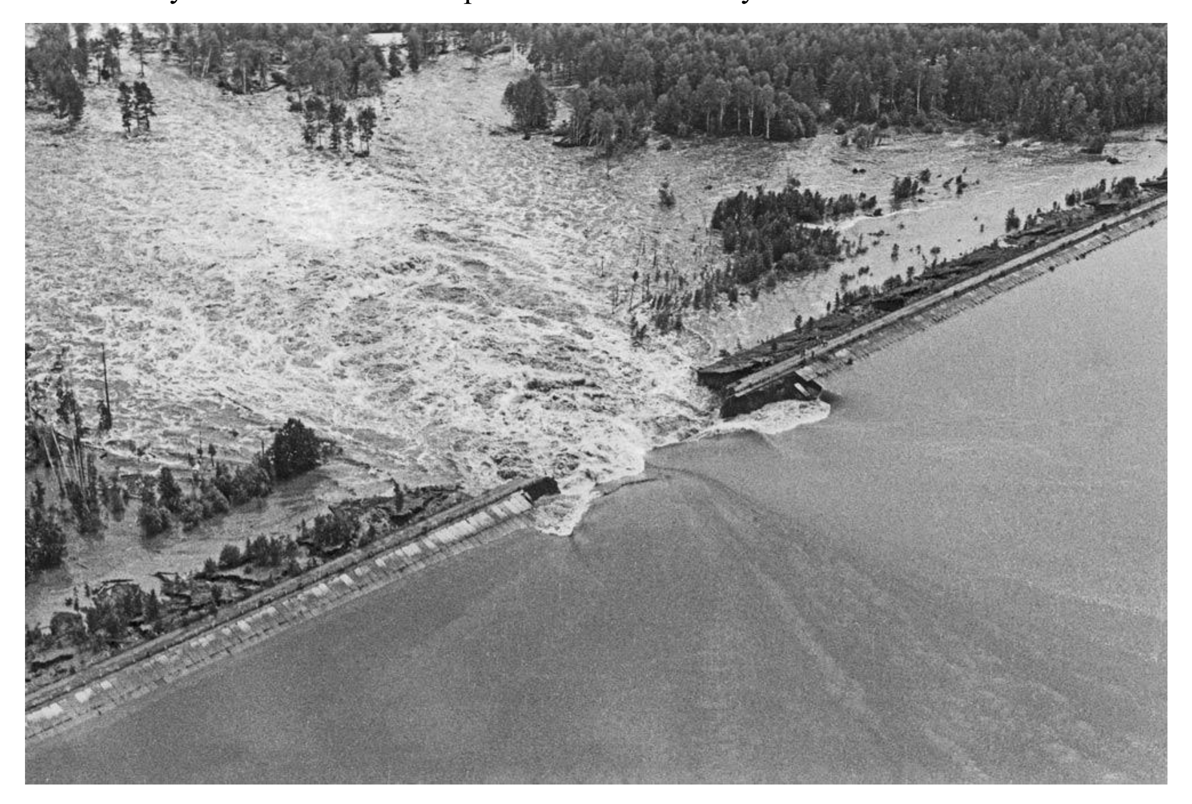


Рисунок 3. Крепление откоса верхнего бьефа плотины. Фото В. Суворина. Источник: https://uraloved.ru/images/mesta/sv-obl/serov/kakva-1993-9.jpg

Figure 3. Fastening slope of the upstream dam. Photo by V. Suvorin. URL: https://uraloved.ru/images/mesta/sv-obl/serov/kakva-1993-9.jpg

После непосредственного расчета по методикам ПМП-91 и РД 03-607-03 была составлена сводная таблица (таблица 2).

Таблица 2. Сводная таблица рассчитанных и наблюденных максимальных расходов воды и ширины прорана

Table 2. Summary table of calculated and observed maximum water discharge and width of closure channel

Водохранилища	Δh	Расходы воды Q, м^3/с			Ширина прорана, м		
		ПМП-91	РД 03-607-03	Экспертная оценка	ПМП-91	РД 03-607-03	Наблюденные
Кокпектинское	0,01	8570	1550	1000 ± 200	235	29	60
	0,1		2075			29	
	0,5		4910			30	
Тирлянское	0,01	3160	8430	1800 ± 300	112	55	75
	0,1		10700			55	
	0,5		24000			56,5	
Киселевское	0,01	36660	42200	4800 ± 1000	480	92	70
	0,1		50900			92	
	0,5		101400			94	

Дискуссия

Методика, изложенная в МР-81 и ПМП-91, не имеет под собой физического обоснования. Расчеты параметров прорана и максимальных расходов волны прорыва отличаются от экспертных оценок в разы. Предположение о функциональной зависимости размера прорана и максимального расхода волны прорыва (таблица 3) от длины плотины представляется абсурдным.

Приведенные значения априори предопределяют невозможность использования предлагаемой методики для практических расчетов. В зависимости (2) отсутствует определяющий параметр – объем водохранилища на момент прорыва. А именно от него будут зависеть максимальный расход прорывной волны и окончательные геометрические размеры прорана.

Таблица 3. Расчетные значения максимального расхода и ширины прорана в зависимости от длины плотины

Table 3. Calculated maximum discharge and width of closure channel depending on dam length

B, м	20	50	100	200	300	500	1000	2000	5000
b, м	9,6	22	40	70	93	125	250	500	1250
Q (H=2 м), м^3/с	15,2	34,9	63,5	111	148	198	397	794	1984
Q (H=5 м), м^3/с	28,1	64,3	117	205	272	366	731	1462	3655

Более адекватной является пошаговая расчетная схема, прописанная в РД 03-607-03. Вместе с тем, она имеет принципиальные недостатки. Полученные характеристики прорана зависят от характеристик грунта и размывающей способности потока опосредованно через так называемую транспортирующую способность потока. В контексте РД 03-607-03, транспортирующая способность потока определяется безразмерной эмпирической зависимостью:

$$\mu = 0{,}01\left(\frac{V_{кр} - V_0}{3W_0}\right)^4\left(\frac{d}{R_i}\right)^{1/6},$$

где $V_{кр} = 2{,}63\sqrt{h_i}$, м/с;

V_0 – неразмывающая скорость [Кадацкая и др., 2019], рассчитанная по зависимости Ц.Е. Мирцхулава для связных грунтов, учитывающей сцепление грунта, м/с;

$W_0 = \dfrac{gd^2\rho_в}{18\nu}$ – гидравлическая крупность размываемого грунта, м/с;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м^2/с;

R – гидравлический радиус прорана, м;

d – средневзвешенный диаметр частиц грунта, мм.

Расчет линейных размеров прорана в зависимости от различных вариантов приращений глубины размыва на каждом расчетном шаге приведен в таблице 4. Предложенная схема не может быть работоспособной, если в зависимости от шага приращения глубины при одном и том же расчетном значении глубины размыва ширина прорана отличается в разы. Кроме того, в схеме отсутствует фактор времени размыва.

Таблица 4. Расчетные значения ширины прорана в зависимости от итерационного шага приращения глубины

Table 4. The calculated values of the width of breakthroughs depending on the iterative step of the depth increment

расчетная глубина, м / шаг приращения глубины, м	y	0,5	1	2	3	5	7	9	10	12
$\Delta y = 0{,}5$	b	0,5	0,8	1,3	1,8	2,8	3,8	4,8	5,3	6,3
$\Delta y = 0{,}1$	b	0,5	0,9	1,8	2,6	4,3	5,9	7,6	8,4	10,1
$\Delta y = 0{,}01$	b	0,5	0,99	1,97	2,95	4,91	6,87	8,83	9,81	11,77

Альтернативные методики

Рассмотрим результаты расчетов по разрабатываемой в НПО «Гидротехпроект» физической модели размыва (далее – метод ГТП), основанной на следующих посылах. Скорость размыва прямо пропорциональна энергии струи потока и обратно пропорциональна удерживающему напряжению размываемого грунта тела плотины, площади размыва и времени, затраченного на размыв.

В результате получена следующая зависимость:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{E}{\tau_{уд} S \cdot t}, \qquad (5)$$

где h – мощность размываемого слоя за расчетный шаг времени, м;

t – время, с;

S – площадь размываемого участка, м^2;

E – энергия струи потока, кг·м^2/с^2;

$\tau_{уд}$ – удерживающее напряжение, кг/м·с^2:

$$\tau_{уд} = \rho_г (1-\varepsilon) gh \cdot tg\varphi + c \qquad (6)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град;

c – сцепление грунта, кг/м·с^2.

Проинтегрируем зависимость (5) с учетом того, что $E = \frac{mV^2}{2}$:

$$\left(c + h\rho_г g(1-\varepsilon)tg\varphi\right)dh = \frac{mV^2}{2(B + 2H_в)Lt}dt$$

$$\int\left(c + h\rho_г g(1-\varepsilon)tg\varphi\right)dh = \int\frac{mV^2}{2(B + 2H_в)Lt}dt$$

$$ch + \frac{h^2}{2}\rho_г g(1-\varepsilon)tg\varphi = \frac{mV^2}{2(B + 2H_в)L}\ln t + C$$

Граничные условия

$V = 0, h = 0 \rightarrow C = 0$

Окончательно

$$ch + \frac{h^2}{2}\rho_г g(1-\varepsilon)tg\varphi = \frac{mV^2}{2(B + 2H_в)L}\ln t$$

Результаты расчета по представленной методике приведены в таблице 5 в сравнении с экспертными оценками и наблюденными параметрами. Наблюденное время развития прорана в дамбе Киселевского водохранилища приведено по косвенным данным.

Таблица 5. Таблица рассчитанных по методу ГТП и экспертных оценок и наблюденных параметров прорывной волны и ширины прорана

Table 5. The table calculated by the method of Gidrotehproekt and the expert estimates and observed parameters of the dam break wave and the width of the breakthroughs

Водохранилища	Расходы воды Q, м^3/с		Ширина прорана, м		Время, мин	
	Метод ГТП	Экспертная оценка	Метод ГТП	Наблюденные	Метод ГТП	Наблюденные
Кокпектинское	1800	1000 ± 200	51	60	43	45
Тирлянское	1980	1800 ± 300	72	75	85	80
Киселевское	5000	4800 ± 1000	116	70	130	180(?)

Следующий метод расчета описан в [Пономарчук, 2011]. Для расчета ширины прорана B_t предложена зависимость (7), где показатели степени при значении напора и коэффициент *C* являются эмпирическими.

$$B_t = C\sqrt{g}\int_0^t \frac{h_t^{4,5}}{w_{уд}^2}\cdot\left(1-\frac{h_н}{h_t}\right)^{0,3} dt \qquad (7)$$

Расход через проран рассчитывается по формуле водослива практического профиля [Чугаев, 1982]:

$$Q_{изл.t} = -\frac{dW_t}{dt} = m\varepsilon\sigma_n B_t\sqrt{g}h_t^{3/2} \qquad (8)$$

где h_t – напор, м;

$h_н$ – напор, соответствующий неразмывающей скорости, м;

W_t – объем воды в водохранилище на момент времени t, м^3;

$w_{уд}$ – площадь поперечного сечения плотины, м^2;

m – коэффициент водослива ($0,32 \div 0,38$);

ε – коэффициент бокового сжатия;

σ_n – коэффициент подтопления [Чугаев, 1982].

Результаты расчета по представленному в [Пономарчук, 2011] методу приведены в таблице 6 в сравнении с экспертными оценками и наблюденными параметрами.

Таблица 6. Таблица рассчитанных по [Пономарчук, 2011] и экспертных оценок и наблюденных параметров прорывной волны и ширины прорана

Table 6. The table calculated by the model and the expert estimates and observed parameters of the dam break wave and the width of the breakthroughs

Водохранилище	Расходы воды Q, м^3/с		Ширина прорана, м		Время, мин	
	[Пономарчук, 2011]	Экспертная оценка	[Пономарчук, 2011]	Наблюденные	[Пономарчук, 2011]	Наблюденные
Кокпектинское	1400	1000 ± 200	58	60	50	45
Тирлянское	1640	1800 ± 300	83	75	150	80
Киселевское	6150	4800 ± 1000	131	70	80	180(?)

Выводы

1. Методики, рекомендованные к применению (МР-81; ПМП-91; РД 03-607-03) не имеют под собой физического обоснования (ПМП-91) или основаны на ошибочных постулатах (РД 03-607-03). Ошибки в расчетах, проведенных по этим методикам, могут составлять 1000%, что практически недопустимо. Методики не учитывают объем водохранилища на момент прорыва (ПМП-91), построены на эмпирических, не отвечающих конкретным условиям соображениях (ПМП-91 и РД 03-607-03). Результаты расчета в разы отличаются друг от друга в зависимости от выбранного шага приращений глубины (РД 03-607-03).

2. Разрабатываемая в НПО «Гидротехпроект» методика основана на описании физики процесса размыва. Расчетные параметры хорошо согласуются с измеренными в реальных условиях.

3. Методика, описанная в [Пономарчук, 2011] также дает хорошие результаты. Параметры волны прорыва и прорана малых водохранилищ по этой методике имеют лучшую сходность с измеренными. Бóльшую погрешность методика дает только при расчете Киселевской катастрофы.

4. В случае Киселевской катастрофы завышенное значение расчетной ширины прорана по сравнению с измеренной объясняется креплением верхового откоса железобетонными плитами.

Литература

Бобков С.Ф., Боярский В.М., Векслер А.Б., Швайнштейн А.М. Основные факторы учета пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности // Гидротехническое строительство. 1999. №4. С. 2-9.

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Беленький Ю.И., Ба-

References

Bobkov S.F., Boyarskii V.M., Veksler A.B., Shvainshtein A.M. Osnovnye faktory ucheta propusknoi sposobnosti gidrouzlov pri deklarirovanii ikh bezopasnosti [The main factors for taking into account the capacity of waterworks when declaring their safety] *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo]*, 1999, no. 4, pp. 2-9. (In Russian).

Chugaev R.R. *Gidravlika: uchebnik dlya vuzov [Hydraulics: a textbook for high schools].* Leningrad, Publ. Energoizdat, 1982. 672 p. (In Russian).

чериков И.В., Хвалев С.В., Каляшов В.А. Анализ методов расчета неразмывающей скорости при проектировании водопропускных и водоотводных сооружений лесного хозяйства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 174-187. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.174-187

Катастрофы конца XX века / Под ред. В.В. Владимирова. М.: Издательство Геополитика, 2001. 400 с.

Малик Л.К. Чрезвычайные ситуации, связанные с гидротехническим строительством ретроспективный обзор // Гидротехническое строительство. 2009. №12. С. 2-16

Пономарчук К.Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины // Природообустройство. 2011. №3. С. 77-82.

Чугаев Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.

Фролов Д.И., Волосухин В.А. Совершенствование российского законодательства по безопасности гидротехнических сооружений // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2012. №6. С. 17-21.

Frolov D.I., Volosukhin V.A. Sovershenstvovanie rossiiskogo zakonodatel'stva po bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Improvement of the Russian legislation on safety of hydraulic engineering constructions]. *Byulleten' «Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii» [Scientific, informative and analitical bulletin «Use and protection of natural resources of Russia»]*, 2012, no. 6, pp. 17-21. (In Russian).

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Belenkiy Yu.I., Bacherikov I.V., Hvalev S.V., Kalyashov V.A. Analiz metodov rascheta nerazmyvayushchei skorosti pri proektirovanii vodopropusknykh i vodootvodnykh sooruzhenii lesnogo khozyaistva [Analysis of methods for calculating non-eroding speed in the design of culverts and drainage forestry facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii [Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii]*, 2019, is. 227, pp. 174-187 (In Russian; summary in English). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.174-187

Katastrofy kontsa XX veka [Disasters of the End of the 20th Century] Ed. V.V. Vladimirov. Moscow, Publ. Geopolitika, 2001. 400 p. (In Russian).

Malik L.K. Chrezvychainye situatsii, svyazannye s gidrotekhnicheskim stroitel'stvom retrospektivnyi obzor [Emergencies related to hydraulic engineering construction retrospective review]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo]*, 2009, no. 12, pp. 2-16. (In Russian).

Ponomarchuk K.R. Otsenka parametrov razvitiya prorana pri razrushenii gruntovoi plotiny [Assessment of parameters of closure channel development at destruction of earth dams]. *Prirodoobustroistvo [Environmental*

тень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2012. №6. С. 17-21

Engineering], 2011, no. 3, pp. 77-82. (In Russian; abstract in English).

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ

SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 624.131.544 : 551.311.2 : 627.141.1
DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.007

К ВОПРОСУ О РАСЧЁТЕ СЕЛЕВЫХ РАСХОДОВ И ВЫСШИХ СЕЛЕВЫХ ГОРИЗОНТОВ 1% И 5% ОБЕСПЕЧЕННОСТЕЙ

Н.А. Казаков[1, 2]

[1]ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
[2]НИЦ «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск, Россия
cdsmd@yandex.ru

Аннотация. Значения селевых расходов 1% и 5% обеспеченностей порой рекомендуется рассчитывать через расчёты расходов и уровней водных паводков в селеносных водотоках 1% и 5% обеспеченности. Такие расчёты, в свою очередь, выполняются на основе расчётов 1% и 5% обеспеченности осадков, выпадающих в селевом бассейне. Однако обеспеченность расхода селевого потока далеко не всегда соответствует обеспеченности расхода водного потока, поскольку доминирующую роль в селевом процессе играют геологические факторы селеобразования. Возникновению селя предшествует

TO THE QUESTION ABOUT CALCULATION OF DEBRIS-FLOWS DISCHARGE AND HIGHER DEBRIS-FLOWS HORIZONS OF 1% AND 5% REPEATABILITY

Nikolay A. Kazakov[1, 2]

[1]Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
[2]Research Center «Geodinamics», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
cdsmd@yandex.ru

Abstract. When performing engineering surveys, it is recommended to calculate the discharge and values of 1% and 5% of the debris-flows frequency. This frequency is calculated as 1% and 5% flow frequency of water discharge and flood water levels. Such calculations, in turn, are performed on the basis of calculations of 1% and 5% of the precipitation frequency falling. However, the debris-flows frequency does not always correspond to the water flow frequency. This is because the dominant role

Kazakov N.A. To the question about calculation of debris-flows discharge and higher debris-flows horizons of 1% and 5% repeatability. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 296-301 (in Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.007

период подготовки рыхлообломочного материала в селевых очагах (накопление критического объёма рыхлообломочного материала и достижение им определённой степени увлажнения пород) и паводок, вызвавший формирование селя по своим параметрам может быть меньше паводка, равного по обеспеченности данному селевому потоку. При соответствующем накоплении рыхлообломочного материала в селевых очагах и сильного увлажнения грунтов в потенциальных селевых массивах формирование селей вызывается сравнительно небольшими осадками. По этим причинам расчёт обеспеченности параметров селевого потока на основе только гидрологических расчётов недопустим, поскольку при определении обеспеченности максимальных параметров селевых потоков нельзя механически оперировать равной обеспеченностью селевого и водного расходов (на основе которого и предлагается определить селевой расход). Методов расчёта обеспеченности тех параметров селевых потоков, которые определяют величину селевого расхода и объёма единовременных селевых выносов на основе геологических факторов селеобразования, не существует. При проектировании объектов и сооружений или при решении научных задач использование характеристики «селевой расход 5%, 1% и т.д. обеспеченности» представляется недопустимым, поскольку приводит к необоснованному занижению степени селевой опасности для объекта и к в корне неверному

of the debris-flows process is played by geological factors of debris-flows formation. The occurrence of a debris-flow is preceded by a period of preparation of loose-rocks in debris-flows site (accumulation of a critical volume of loose-rocks and its achievement of a certain degree of moisture of loose-rocks) and the flood that caused the formation of a debris-flows in its parameters may be less than the flood. Equal in repeatability to with the corresponding accumulation of loose-rocks in debris-flows basin and strong soil moisture in potential debris-flows massif, the formation of debris-flows is caused by relatively small precipitation. For these reasons, the calculation of the frequency of debris-flows volumes and discharge on the basis of hydrological calculations only is unacceptable. When determining the frequency of the debris-flows maximum volumes and discharge, it is cannot to operate mechanically to compare the frequency of debris-flows and water discharge. There are no methods for calculating on the basis of geological factors the frequency of those parameters of debris-flow that determine the it's volume. When designing objects and structures or when solving scientific problems, the use of the characteristic "5%, 1% of the debris-flows frequency" is unacceptable, since it leads to an unjustified underestimation of the degree of debris-

Казаков Н.А. К вопросу о расчёте селевых расходов и высших селевых горизонтов 1% и 5% обеспеченностей // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 296-301. DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.007

представлению о селевых процессах. Всё вышеизложенное в полной мере относится и определению обеспеченности лавин больших объёмов.

Ключевые слова: обеспеченность селевого расхода; повторяемость селей; потенциальный селевой массив; сель; селевой процесс; высший селевой горизонт

flows hazard and to a wrong idea about debris-flows processes. All of the above fully applies to the provision of avalanches of large volumes.

Keywords: debris-flows; debris-flows frequency; debris-flows discharge; potential debris-flow massif; debris-flow process; higher debris-flow level.

Введение

При оценке селевой опасности во время выполнения инженерных изысканий в строительстве проводится оценка и расчёт характеристик селевых процессов и селевого режима, обусловливающих причинение ущерба проектируемым объектам и сооружениям.

Одной из важнейших характеристик селевого режима является повторяемость (обеспеченность) селей разных объёмов.

Постановка задачи

Нормативными документами, регламентирующими состав работ по селевым изысканиям в строительстве, расчёт величины селевых расходов и высших селевых горизонтов 1% и 5% обеспеченности не предусмотрен, поскольку методик расчёта таких расчетов не существует.

В научной литературе значения селевых расходов 1% и 5% обеспеченностей в высокогорье и среднегорье для селевых бассейнов, в которых потенциальные селевые массивы представлены моренными отложениями, а механизм зарождения селя – эрозионный (эрозионно-транспортный тип селевого процесса), порой рекомендуется рассчитывать как значения 1% и 5% обеспеченностей через расчёты расходов и уровней водных паводков в селеносных водотоках 1% и 5% обеспеченности.

Такие расчёты в свою очередь выполняются на основе расчётов 1% и 5% обеспеченности осадков, выпадающих в селевом бассейне.

Однако обеспеченность расхода селевого потока далеко не всегда соответствует обеспеченности расхода водного потока, поскольку доминирующую роль в селевом процессе играют геологические факторы селеобразования [Казаков, 2000].

Поскольку возникновению селя, как правило, предшествует период подготовки рыхлообломочного материала в селевых очагах (накопление критического объёма рыхлообломочного материала и достижение им определённой степени увлажнения пород), паводок, вызвавший формирование селевого потока, по своим параметрам может быть меньше паводка, равного по обеспеченности данному селевому потоку.

Например, объёмы и расходы селей, сформировавшихся 5-6.08.1967 г. в селевых бассейнах Северного Кавказа соответствовавшие 1% обеспеченности были вызваны расходами воды, соответствовавшими 20% обеспеченности [Флейшман, 1978]. Такие же случаи неоднократно наблюдались на о. Сахалин и в других регионах Российской Федерации.

В тоже время, при соответствующем накоплении рыхлообломочного материала в селевых очагах и сильном увлажнении грунтов в потенциальных селевых массивах, формирование селей (в том числе, большого объёма) вызывается сравнительно небольшими осадками, при выпадении которых породы потенциального селевого массива теряют связность и переходят в движение, формируя связные сели [Казаков, 2000].

По этой причине расчёт обеспеченности селевого потока через расчёты расходов и уровней водных паводков не в полной мере применим даже для расчёта характеристик и режима селевых потоков в тех районах высокогорья и среднегорья, в которых потенциальные селевые массивы представлены моренами (потенциальные селевые массивы обводнения), а тип селевого процесса – эрозионный или эрозионно-транспортный.

В тех селевых бассейнах, в которых потенциальные селевые массивы представлены коллювиально-делювиальными отложениями (потенциальные селевые массивы накопления), а тип селевого процесса – сдвиговый или эрозионно-сдвиговый, прямая зависимость между характеристиками гидрометеорологического режима территории и характеристиками селевых процессов отсутствует.

По этим причинам расчёт обеспеченности параметров селевого потока на основе только гидрологических расчётов недопустим, поскольку при определении обеспеченности максимальных параметров селевых потоков нельзя механически оперировать равной обеспеченностью селевого и водного расходов (на основе которого и предлагается определить селевой расход).

Например, при формировании грязекаменных селей во время экспериментов Ю.Б. Виноградова в урочище Чемолган, водный поток расходом 15 м^3/с породил грязекаменный сель с расходом 115 м^3/с [Виноградов, 1980].

Методов расчёта обеспеченности тех параметров селевых потоков, которые определяют величину селевого расхода и объёма единовременных селевых выносов на основе геологических факторов селеобразования, не существует.

Мнение

Исходя из вышеизложенного, при проектировании объектов и сооружений или при решении любых других задач (в том числе, научных) использование характеристики «селевой расход 5%, 1% и т.д. обеспеченности» представляется недопустимым, поскольку приводит к необоснованному занижению степени селевой опасности для объекта и к в корне неверному представлению о селевых процессах.

При оценке воздействия селевых процессов на объекты и сооружения следует учитывать, что расчёт среднестатистической повторяемости селей (как и других природных явлений) представляет собой более математическое упражнение, нежели решение практической задачи, поскольку распределение частоты повторяемости селей заданных параметров (которые зависят от множества как детерминированных, так и стохастических факторов) внутри математического интервала реально рассчитать невозможно.

По этой причине при оценке степени вероятного воздействия селей на объекты капитального строительства необходимо принимать во внимание только сели максимальных объёмов, с максимальными дальностями выброса и с максимальной высотой фронта, способные причинить проектируемым объектам и сооружениям максимальный ущерб.

Таким образом, для решения прикладных задач (защита объектов и сооружений от воздействия селевых процессов) расчёт обеспеченности (повторяемости) селей **с малыми и средними значениями расхода и объёма** лишен смысла, поскольку обеспечение противоселевой защиты (особенно, объектов капитального строительства и селитебных территорий) должна обеспечиваться с учётом максимальных селевых рисков: то есть рисков воздействия селей с максимальными значениями их параметров.

Выводы

При оценке воздействия селей на объекты, сооружения и селитебные территории во время выполнения инженерных изысканий в строительстве должны рассчитываться

максимальный селевой расход и максимальный объём селя как величины, обеспеченность которых должна приниматься не менее чем 20%.

Всё вышеизложенное в полной мере относится и к лавинным процессам: к вопросу об определении обеспеченности лавин больших объёмов и максимальной дальности выброса.

Литература

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.

Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин): Автореф. дисс. … канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 2000. 36 с.

Флейшман С.М. Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 312 с.

References

Fleishman S.M. *Seli. [Debris flow]*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Kazakov N.A. *Geologicheskie i landshaftnye kriterii ocenki lavinnoj i selevoj opasnosti pri stroitel'stve linejnyh sooruzhenij (na primere o. Sahalin). Avtoref. diss. kand. geol-min. najuk. [Geological and landscape criteria for assessing avalanche and debris flow hazard during the construction of linear structures (on the example of Sakhalin Island). Ph. D. (geological and mineralogical) Thesis]*. Yuzhno-Sahalinsk, 2000. 36 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (in Russian).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли.
2. Опасные процессы и явления в гидросфере Земли.
3. Эволюция гидросферы Земли.
4. Экологические проблемы и опасности в гидросфере Земли.
5. Методология и методика исследований.
6. Научные дискуссии.
7. Хроника.

Плата за публикации статей не взымается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;
- шрифт Times New Roman, размер – 12 pt;
- междустрочный интервал – полуторный, переносы в словах не допускаются;
- абзацный отступ – 1,5 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;
- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);
- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;
- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

Основной текст статьи.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащпй актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;
- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;
- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;
- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Отсылка на затекстовые библиографические ссылки приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *Фамилия И.О.* Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на материалы в сборнике конференции: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 10 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); авторская справка.

При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 300 слов).

Подробные правила оформления статьей приведены на сайте журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»: http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena" in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes and phenomena in the hydrosphere of the Earth
3. The evolution of the Earth's hydrosphere
4. Ecological problems and hazards in the hydrosphere of the Earth.
5. Methodology and research methods
6. Scientific discussions
7. Chronicles

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal's website in the public domain. Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 12 pt;
- line spacing – 1,5, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1,5 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)' name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figuries should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the curent article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. *Title of book*. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book.* City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. *Title of thesis. Thesis type.* City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Conference Proceedings (date and place of the conference)*, City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49-53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49-53. Available at: http://example.com/example.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);
academic degree and title;
organization affiliation with full address (including Post Code);
position in organization;
contact telefon (for all authors);
contact e-mail (for all authors);
scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena”: http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements

Научное издание

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ.

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: М.М. Кадацкая

На обложках фото и рисунки Н.А. Казакова

Подписано в печать 16.12.2019. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская
Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № 5243

Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект»
Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений:
199155 Санкт-Петербург, а/я 136

Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28




ISSN 2686-7877
9 772686 787001 >